

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.03.02

双光梳光谱测量技术

汤璐璐, 顾澄琳*, 罗大平, 邓泽江, 潘海峰, 李文雪

(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)

摘要: 双光梳光谱技术是一种先进的精密光谱测量技术, 具有高分辨力、高频率精度、快速测量和宽带光谱覆盖等优点, 已在光谱激光雷达、温室气体监测、燃烧诊断等测量领域中广泛应用。关于双光梳光谱的新原理、新方案和新技术不断涌现, 因此有必要对其发展现状进行梳理和总结。本文详细地阐述了双光梳光谱技术的原理和性能指标, 分析对比了光频参考、电光调制、单腔双光梳和光调制四种典型双光梳光谱测量系统的实验方案和优势, 同时具体分析了双光梳光谱技术在工作波段拓展方向的发展现状, 最后对双光梳光谱系统的发展趋势和应用前景进行了总结和展望, 为双光梳光谱技术在全波段光谱测量和多场景应用中的进一步提升提供参考。

关键词: 双光梳光谱技术; 光学频率梳; 激光光谱学; 精密测量; 非线性频率准换

中图分类号: TB96

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)03-0017-12

Dual-comb spectroscopy technology

TANG Lulu, GU Chenglin*, LUO Daping, DENG Zejiang, PAN Haifeng, LI Wenxue

(State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Dual-comb spectroscopy (DCS) is an advanced precision spectral measurement tool with high resolution, high frequency accuracy, rapid measurement speed, and broad bandwidth. Thus, it has been widely used in many fields such as spectral lidar, greenhouse gas monitoring, and combustion diagnosis. As new principles, new schemes and new technologies of dual-comb spectroscopy are emerging, it is necessary to sort out and summarize their current development status. In this paper, the principles and technical performance indexes of dual-comb spectroscopy are introduced, and the experimental schemes and advantages of four typical DCS measurement systems are analyzed and compared, including optical frequency reference, electro-optical modulation, single-cavity dual-comb, and optical-optical modulation. Meanwhile, the development status of dual-comb spectroscopy in the expansion of the operating band is analyzed. Finally, the development trend and application prospects of DCS systems are summarized and prospected, which can provide a reference for further improvement of dual-comb spectroscopy in full-band spectral measurements and multi-scene applications.

Key words: dual-comb spectroscopy technology; optical frequency comb; laser spectroscopy; precision measurement; nonlinear frequency conversion

0 引言

光学频率梳(简称“光频梳”)的发明, 不仅补全了光学原子钟所需的连接微波频率和光学

频率的齿轮, 同时为传统的精密分子光谱学带来了高分辨力、高精度和快速宽带光谱测量的新手段^[1-3]。科学家 Hänsch T. W.^[4] 和 Hall J. L.^[5] 提出了光频梳技术, 对精密光谱学领域作出了突出贡

收稿日期: 2022-12-09; 修回日期: 2023-02-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(12134004); 国家自然科学基金面上项目(12274141); 国家自然科学基金青年基金项目(12104162)

引用格式: 汤璐璐, 顾澄琳, 罗大平, 等. 双光梳光谱测量技术[J]. 计测技术, 2023, 43(3): 17-28.

Citation: TANG L L, GU C L, LUO D P, et al. Dual-comb spectroscopy technology[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(3): 17-28.



献, 获得了2005年的诺贝尔物理学奖。在精密光谱测量应用中, 发展了多种直接光频梳光谱技术, 其基本原理是将光频梳与色散光谱法^[6]、干涉测量法^[7]和频率滤波法^[8]等在内的多种光谱测量方法相结合, 利用光频梳的频率精度和稳定性来提升传统光谱测量技术的性能参数。由于光频梳的梳齿频率精度由现有的射频原子钟直接传递, 并且频率间隔(即其采样分辨力, 典型值在100 MHz ~ 1 GHz)远小于目前已知所有光谱仪的分辨力, 因此与传统的光谱测量手段相比, 光频梳在光谱分辨力、频率准确度等方面都有显著的提升。与高分辨力虚拟成像相控阵(Virtually Imaged Phase Array, VIPA)光谱仪^[9]和傅里叶变换光谱仪(Fourier Transform Spectroscopy, FTS)^[10]相比, 光频梳光谱技术在光谱分辨力和测量精度上也有非常明显的优势。

双光梳光谱技术(Dual Comb Spectroscopy, DCS)是基于光频梳发展起来的一种先进光谱测量技术, 因兼具传统飞秒激光光谱的宽带宽和可调谐窄线宽激光光谱的高精度技术优势而受到青睐^[11-15]。DCS利用重复频率略有不同的两台相干光频梳, 在时域上形成快速的光学异步采样, 本质上等同于高速扫描的傅里叶变换光谱仪, 其光谱分辨力和频率精度取决于光频梳的时频特性^[16]。DCS无需任何色散元件和机械位移扫描装置即可实现上万根梳齿频率的并行光谱探测。DCS光谱仪与色散光谱仪和FTS光谱仪相比, 在分辨力、频率精度、采集速度和信噪比方面具有技术优势。目前, DCS已广泛应用于超宽带近红外光谱^[17]、亚波长空间分辨力的近场显微镜^[7, 18]、分子谱线的精密计量^[17, 19-20]、光谱激光雷达^[21-22]、绝对距离测量^[23]和温室气体监测^[24-26]等领域, 并激发衍生了一系列新型光梳光谱技术, 如时间分辨光梳光谱^[27-28]、相干拉曼光梳光谱^[29]、光声光梳光谱^[30]、腔增强光梳光谱^[31]和双光子光梳光谱^[32]技术等。

本文首先介绍DCS的基本原理及关键性能参数, 分析对比光频参考、电光调制和光调制三种典型DCS系统的实验方案和优势, 然后从工作波段拓展的角度详细介绍DCS的发展现状, 重点阐述了利用非线性频率转换技术实现中红外DCS的技术方案, 最后对DCS的应用前景和发展趋势进行展望。

1 双光梳光谱技术

1.1 原理

光频梳在时域上表现为等时间间隔的飞秒脉冲序列, 如图1(a)所示; 在频域上表现为等频率间隔的上万根至几十万根光学频率梳齿^[33], 如图1(b)所示。光频梳包含重复频率 f_r 和载波包络相位偏移频率 f_{ceo} 两个自由度, 通过对 f_r 和 f_{ceo} 的高精度地控制和锁定, 将光频梳各梳齿频率参考于射频标准信号, 即可获得高精度的光频梳光源, 其梳齿光学频率 ν_n 为

$$\nu_n = nf_r + f_{ceo} \quad (1)$$

式中: n 为梳齿模式数。

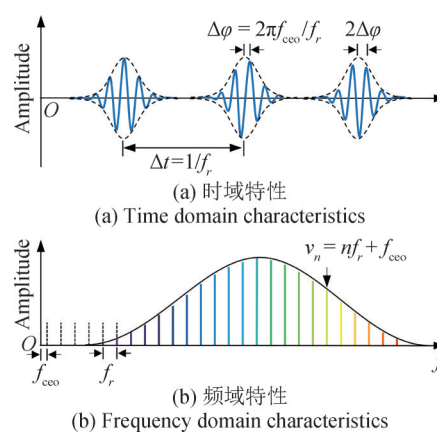


图1 光学频率梳原理图

Fig.1 Principle of optical frequency comb

DCS的测量过程表现为两束重复频率略有差异的相干光频梳进行多外差拍频, 在频域上的原理示意图如图2(a)所示, 光频梳齿一一对应下转换至射频区域, 梳齿射频频率 $\Delta\nu_n$ 可表示为

$$\Delta\nu_n = \nu_{n,1} - \nu_{n,2} = (nf_{r,1} + f_{ceo,1}) - (nf_{r,2} + f_{ceo,2}) \quad (2)$$

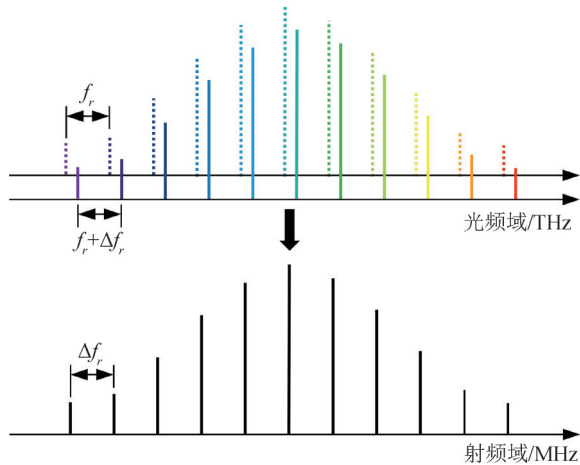
$$= n\Delta f_r + \Delta f_{ceo}$$

式中: $\nu_{n,1}$ 和 $\nu_{n,2}$ 分别为两个光频梳光源的梳齿光学频率, Hz; Δf_r 为双光梳的重复频率差, Hz, $\Delta f_r = f_{r,1} - f_{r,2}$ 。

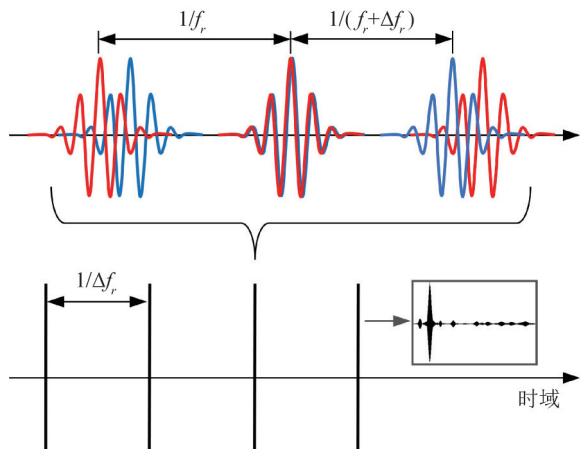
利用合适的光电探测器, 探测到双光梳的电场干涉图, 然后通过傅里叶变换即可获得其光谱强度和相位信息。根据奈奎斯特定理, 为避免频域的混叠效应, 光谱带宽 $\Delta\nu$ 必须满足 $\Delta\nu \leq \frac{f_r^2}{2\Delta f_r}$, 以实现光频至射频一一对应的下转换^[33]。

DCS测量过程在时域上的原理示意图如图2

(b) 所示, 通过两个光脉冲的异步采样实现干涉图的不断刷新。采集的干涉图的刷新率由两个光频梳的重复频率差决定, 记为 Δf_r , 与 FTS 的机械运动扫描相比, 具有更高的刷新速度。每隔 $1/f_r$ 时间会产生一对来源于两个光频梳的脉冲对, 两个光脉冲之间的相对时间延迟相比上一对脉冲对增加了 $\Delta f_r/f_r^2$ 。此时, 使用光电探测器将时域干涉信号记录下来, 经过傅里叶变换反演处理即可获得光谱的强度和相位信息。图 2 (b) 中的插图展示了分子的自由感应衰减信号 (Free-induced Decay, FID)。与原理类似的傅里叶变换光谱仪相比, DCS 光谱仪可以将光谱信息下转换至数十 MHz 的射频区域内, 其附加白噪声 ($\propto 1/f$) 较低, 可以实现更高的信噪比。



(a) 双光梳的频域多外差过程
(a) Multiheterodyne in frequency domain of DCS



(b) 双光梳的时域异步光采样过程
(b) Asynchronous optical sampling in time domain of DCS

图2 双光梳原理图

Fig.2 Principle of dual-comb

1.2 性能分析

光谱分辨力、采样速度、信噪比 (Signal-to-noise Ratio, SNR)、光频梳的噪声和 DCS 相干性是衡量 DCS 测量系统性能的重要指标^[11]。DCS 的光谱分辨力由光频梳的梳齿间隔 f_r 决定, 即 DCS 光源的重复频率, 与激光器的腔长成反比^[34]。类似于传统 FTS 技术的切趾操作^[29, 35], DCS 测量往往也会选取小于完整周期的时间窗口 T_{ap} 截取干涉信号, 此时切趾分辨力 f_{res} 为

$$f_{res} = \frac{f_r}{\Delta f_r T_{ap}} \quad (3)$$

DCS 光源的重复频率差 Δf_r 也是下转换射频梳的重复频率, 即 DCS 射频干涉信号表现为以 Δf_r 为重复频率的一系列等时间间隔的干涉图样, 每一个干涉图样均包含完整的光谱信息, 因此 DCS 光源的重复频率差 Δf_r 直接决定了系统的采样速度及单次测量时间 $1/\Delta f_r$ 。

在 DCS 系统中, 光谱带宽 $\Delta\nu = M \times f_r$, 其中 M 为测量得到的梳齿数目。DCS 技术将带宽为 $\Delta\nu$ 的光谱下转换到带宽为 $\Delta\nu/m$ 的射频光谱, 其中变换系数 $m = f_r/\Delta f_r$ 。根据奈奎斯特采样定理, 避免频域的混叠效应要求 $\Delta\nu/m \leq f_r/2$, 因此光谱带宽 $\Delta\nu$ 满足

$$\Delta\nu \leq \frac{f_r^2}{2\Delta f_r} \quad (4)$$

光谱带宽与采样速度之间具有相互制衡的关系, 提高采样速度的同时会限制可以获得的最大光谱带宽。以重复频率 $f_r = 100$ MHz, 重复频率差 $\Delta f_r = 1$ kHz 的 DCS 系统为例, 不考虑切趾的光谱分辨力 $f_r = 100$ MHz, 单次光谱测量时间为 1 ms, 可获得带宽 $\Delta\nu \leq f_r^2/2\Delta f_r = 5$ THz 的有效光谱测量。不同的应用场景需要选择合适的 DCS 系统参数, 实现采样速度和光谱带宽的最优化。

评价 DCS 系统性能的一个重要指标是 SNR, 即信号强度与噪声强度的比值。在理想的噪声极限下, DCS 的 SNR 满足^[11]

$$SNR \propto \frac{\sqrt{T}}{M} \quad (5)$$

式中: T 为数据测量时间, s。

DCS 使用单个探测器就可记录上万根光谱频率齿, 从式 (5) 可知, 对于 M 根梳齿数目, 当将固定的激光功率分散到 M 个光谱成分上时, 单根梳

齿 SNR 会降低为原来的 $1/M$ 倍。同时, 随着测量时间的增加, 高相干双光梳光源可实现长时间相干平均, 其 SNR 随测量时间的平方根线性增加, 因此在实际测量过程中, 可以通过对测量时间内大量单周期干涉图样进行相干平均以提高光谱 SNR 。

光学频率梳的频率稳定性直接影响了其测量精度, 而频率稳定性主要由频率梳的噪声特性所决定, 因此噪声分析对于 DCS 系统至关重要。噪声在时域上表现为光源脉冲序列的强度和时间的抖动, 下转换的干涉信号表现出快速抖动; 在频域上表现为 DCS 光源 f_r 和 f_{ceo} 的抖动, 进而导致光频梳梳齿加宽, 下转换的射频梳齿同样加宽 (即射频梳齿线宽增加)。光频梳的噪声主要分为激光器的腔内噪声和腔外噪声^[36]。腔内噪声包括外界环境扰动引发的腔长和损耗变化、泵浦强度噪声和激光器放大的自发辐射等; 腔外噪声包括超连续产生等非线性过程的累积噪声、外界环境影响光程抖动和探测器散粒噪声等。环境噪声位于低频段, 一般小于 500 Hz, 是光频梳的主要噪声来源, 可采用对激光腔的环境隔离实现噪声抑制。泵浦噪声位于中低频段, 一般在 0.5 ~ 50 kHz 范围, 需要选择强度稳定的泵浦源对其进行抑制。自发辐射等量子噪声位于高频段, 一般在 50 ~ 500 kHz 范围, 通过合理设计激光器可减小该噪声。探测器散粒噪声等腔外噪声属于更高频段的白噪声, 可以选择低噪声探测器或者外差平衡探测器对其进行抑制。在采用以上噪声抑制措施的基础上, 采用锁相环电路反馈控制技术控制光频梳的 f_r 和 f_{ceo} , 实现噪声抑制和频率稳定, 提升激光器相干性。衡量噪声的参数主要包括噪声功率谱密度、光频梳梳齿的线宽、频率的相位抖动、时间抖动等。

在式 (1) 中引入噪声项得到带噪声的光频梳梳齿频率, 可表示为

$$v_n + \delta v_n = n(f_r + \delta f_r) + (f_{ceo} + \delta f_{ceo}) \quad (6)$$

在式 (2) 中引入噪声项得到带噪声的射频梳齿频率, 可表示为

$$\Delta v_n + \delta \Delta v_n = n(\Delta f_r + \delta \Delta f_r) + (\Delta f_{ceo} + \delta \Delta f_{ceo}) \quad (7)$$

一般而言, 频率梳齿的抖动 δv_n 远小于单个光频梳的重复频率 f_r , 但经过 DCS 技术的频率下转换, 射频梳齿的抖动 $\delta \Delta v_n$ 与其重复频率 Δf_r 量级相当, 因此在噪声影响下, 射频梳的梳齿容易发生

混叠, 无法实现梳齿可分辨, 降低测量分辨能力。提高梳齿可分辨能力的过程, 就是抑制频率噪声、增加频率稳定性、提高 DCS 光源的互相干性、提高 SNR 的过程。采用第 2 节中提到的主动锁定或者被动锁定方式对 DCS 进行相干控制, 可以实现光源的互相干, 控制射频梳齿线宽小于射频梳的重复频率 Δf_r , 实现梳齿可分辨, 同时通过相干平均过程提高 SNR 。对 DCS 相干性的衡量主要采用梳齿相对线宽、时频域长期稳定性等参数。

光谱分辨力、采样速度、光谱带宽、 SNR 、光频梳的噪声和 DCS 相干性等参数衡量着 DCS 系统的性能, 各参数与激光器的 f_r 和 f_{ceo} 紧密相关, 同时彼此联系, 相互制约。通常采用品质因数 Q 来更直观地表征 DCS 系统的性能, 其可表示为^[37]

$$Q = \frac{SNR \times M}{\sqrt{T}} \quad (8)$$

目前, 常见的 DCS 系统的品质因数已经达到 $10^6 \text{ Hz}^{1/2}$ 量级甚至 $10^7 \text{ Hz}^{1/2}$ 量级。受限于中红外波段探测器等器件的限制, 中红外 DCS 系统的品质因子略低于近红外 DCS 系统。

2 双光梳光谱测量系统的光源发展

理想的稳定光频梳在频率上由上万根极窄的梳齿组成。事实上, 光频梳受到环境噪声影响, 往往偏离理想状态, 导致 DCS 系统的下转换到射频的梳齿发生混叠。实现梳齿可分辨的 DCS 的关键是对 DCS 系统进行相干锁定, 降低噪声引起的光频梳频率抖动, 获得高相干双光梳^[38]。然后, 需要使两光频梳光源之间的互相干时间超过采集时间, 利用信号相干平均的方式提高 SNR 。目前, DCS 系统的相干锁定方式主要分为主动锁定方式和被动锁定方式。

主动锁定方式是对两个光频梳的 f_r 和 f_{ceo} 两个自由度进行主动的探测和锁定控制。利用光电探测器和频率计数器实现 f_r 的探测。然后通过 $f - 2f$ 自参考技术, 即利用高非线性光纤或者波导对光频梳进行光谱展宽得到倍频程超连续谱, 基频光与倍频光差分干涉实现 f_{ceo} 的探测。结合压电陶瓷和电流调制等反馈控制手段可以将 f_r 和 f_{ceo} 锁定至射频参考, 这种方式为自参考射频锁定方式。此外, 将光频梳的两根梳齿分别锁定至两个窄线宽

连续激光器, 另一个光频梳锁定到同样的两个窄线宽连续激光器, 使两个光频梳具有相同的频率漂移, 这种方式为光频参考锁定方式。而被动锁定方式是通过差频产生等技术避免 f_{ceo} 锁定, 仅需通过常规手段锁定 f_r 。

DCS系统在实际应用中, 发展出了不同的实验方案, 其中4种典型的方案为: ①基于光频参考的主动锁定方式^[39]; ②基于电光调制技术^[40]; ③单腔DCS技术; ④光调制技术^[41]的被动锁定方式。下文将对这4种典型DCS测量系统分别进行介绍。

2.1 光频参考双光梳光谱测量系统

光频参考的DCS测量系统通过将两个互相干的光频梳参考锁定到同一个绝对的光学频率标准, 实现了kHz量级的光谱分辨力和频率精度, 可以利用长时相干平均有效提高测量信噪比。以美国国家标准与技术研究院(NIST)的系列工作为例, 他们将DCS系统的光频梳锁定在两个窄线宽稳频连续激光器上^[16, 42-43]。图3所示为Coddington I. 等人^[16]将工作在1550 nm通信波段的光频梳, 反馈锁定在波长为1550, 1535 nm的腔稳定连续稳频激光器上, 两台连续激光器都具有Hz量级的线宽。光频梳的两根梳齿频率被锁定, 从而确定了光频

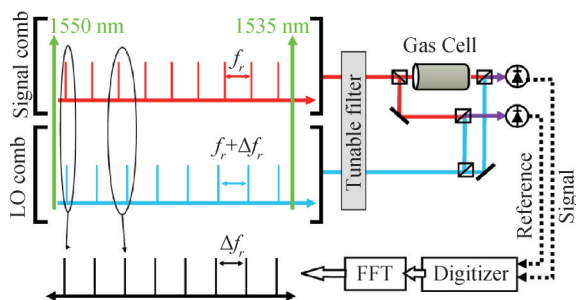


图3 光频参考DCS测量系统^[16]
Fig.3 Optical frequency reference dual-comb spectroscopy measurement system^[16]

梳的任意梳齿。这一锁定方式的优势是在该光谱区域内, DCS光源保持了高度互干性。因此, 光频参考DCS测量系统可以快速探测分子气体的吸收光谱, 具有宽带测量优势和Hz量级的频率精度^[44]。此外, 该技术还应用在动态系统的快速光谱学、光学系统传输和色散的宽带测量以及相干时域泵浦探测实验中, 在宽光谱范围测量的同时, 可以通过相干信号平均实现高信噪比。

2.2 电光调制双光梳光谱测量系统

电光调制DCS测量系统在无锁模激光器的情况下, 产生两个重复频率略有不同的光频梳, 且光谱区域可快速调谐^[40, 45]。图4展示了Milot G. 等人^[40]在C-和L-通信波段实现的电光调制DCS方案。同一台连续激光器的输出激光经分束后, 分别经过两个强度调制器, 获得稍有区别的射频频率调制。调制后的输出光谱半高全宽(Full-Width at Half-Maximum, FWHM)可达~16 GHz。相比基于锁模激光器的DCS系统, 电光调制DCS系统的重复频率差由调制频率差决定。调制产生的两个脉冲串, 利用光纤放大器进行功率放大后, 耦合到具有正色散的高非线性光纤中进行光谱展宽, 以满足宽带光谱测量需求。两个脉冲序列反向传播, 使用同一根高非线性光纤进行光谱展宽, 有效抑制了共模噪声, 形成了高相干的两个光频梳。DCS合束后在单个光电探测器上产生一个干涉信号, 通过光频率的下转换在射频区域内形成频率梳结构。

长久以来, DCS受限于复杂的电学锁定系统和参考反馈系统, 是一种门槛较高的光谱学技术, 其重复频率由锁模激光器腔长决定, 难以实现大范围的调节。而电光调制DCS测量系统采用同一台连续激光器和同一射频频标, 无需多余的参考

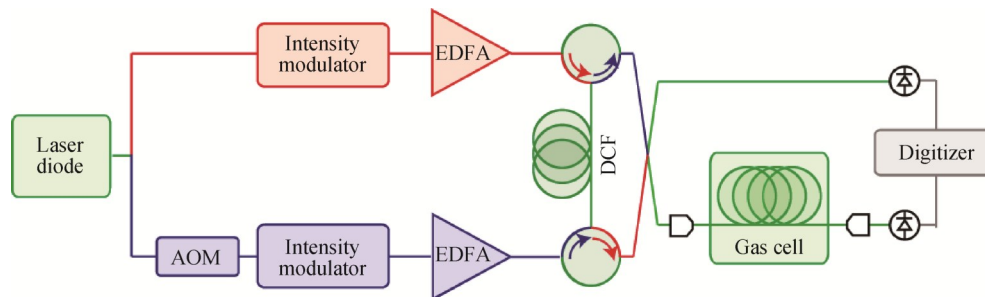


图4 电光调制DCS测量系统^[40]
Fig.4 Electro-optical modulation dual-comb spectroscopy measurement system^[40]

反馈便可实现良好的梳齿模式分辨,且该系统可实现全光纤化集成设计,因此具有结构简单且紧凑的特点。采用的元器件主要为通信工业中已经成熟商用的无源光学元件,有利于发展低成本的DCS仪器。同时,该系统具有强大的灵活可调节性,其重复频率由电光调制器的驱动频率决定,在电光调制器的带宽范围内可任意调节,以满足不同测量环境对分辨力的要求。结合可调谐窄线宽连续激光器,该系统可覆盖更大的光谱范围。Jiang T. 等人^[46]提出了一种结合脉冲重塑、非线性混合和色散补偿的方案,实现了6 dB带宽覆盖150 nm,平均功率超过550 mW的电光调制频率梳。这一方案的宽带光谱覆盖和高功率特性,为实现电光调制DCS的波段转换和拓展电光调制DCS系统的应用领域,提供了良好的支持。

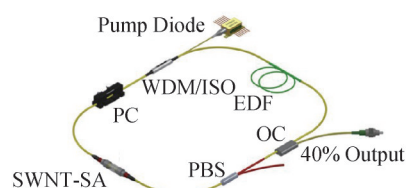
2.3 单腔双光梳光谱测量系统

单腔DCS测量系统在同一个光学谐振腔内产生两列异步光学脉冲序列,两个脉冲共谐振腔和泵浦受同样的外部噪声,从而实现DCS光源的光频互相干性。单腔DCS需要实现两个激光脉冲在同一谐振腔的稳定工作,采用复用谐振腔光学参数的方式实现两个激光的稳定锁模,常用的复用方式有波长复用、方向复用、空间复用和偏振复用。

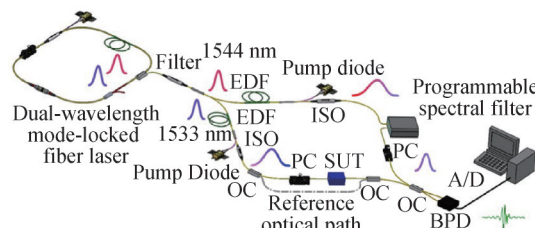
波长复用是指在锁模光纤激光器中插入光谱滤波器件,调节腔参数使得两列脉冲序列中心波长产生偏移,其群速度色散不同使得重复频率不同,从而实现双波长锁模。图5(a)展示了Zheng Z. 等人^[47]在掺铒锁模光纤激光器中加入了一个由光纤偏振分束器和保偏光纤组成的Lyot滤波器,利用激光器的频谱滤波和腔内损耗调节效应实现了双波长锁模。

方向复用是指在激光腔中,顺时针和逆时针方向的光场以不同顺序经过光纤以及光纤器件,双向锁模脉冲具有不同的重复频率。Li B. 等人^[48]设计了双向的掺铒锁模激光器,其工作在正色散区,具有超过1 nJ的输出脉冲能量。

空间复用是指利用非共路腔空间结构实现两列脉冲重复频率差的灵活可调。Zhao K. 等人^[49]设计了空间复用的双色孤子光纤激光器,共用多模光纤作为可饱和吸收体,实现了1.5 μm 和2 μm



(a) 双波长锁模光纤激光器
(a) Dual-wavelength mode-locked fiber laser



(b) 基于双波长锁模光纤激光器的DCS实验装置
(b) Dual-comb spectroscopy experimental setup based on dual-wavelength mode-locked fiber laser

图5 单腔DCS测量系统^[47]

Fig.5 Single-cavity dual-comb spectroscopy measurement system^[47]

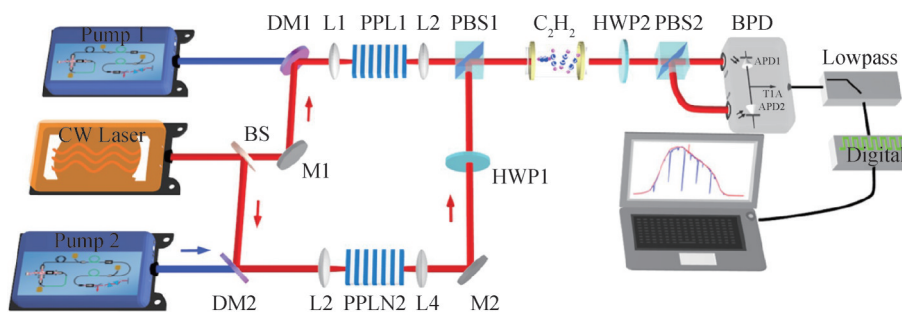
的跨波段同时锁模,不同波段的组合为多光梳的产生提供了可能方案。

偏振复用是指利用双折射效应使得正交偏振的两列脉冲序列分离,产生重复频率不同的异步脉冲序列。李文雪团队^[50]设计的保偏偏振复用掺铒光纤激光器,通过正交偏振光共路传输提高了系统稳定性,且其光谱基本重叠。

由于单腔DCS测量系统的两列脉冲序列在同一台锁模激光器中产生,受相同的环境扰动,因此可以有效抑制两个激光脉冲的共模噪声,具有高固有光频互相干性。该系统一般只需锁定重复频率,装置较为简单,在DCS仪器制备中具有结构紧凑、价格低廉等明显的优势,有利于实现DCS技术的商业化应用。

2.4 光调制双光梳光谱测量系统

光调制DCS测量系统,采用超快光调制技术将连续激光器直接脉冲化,以产生高互相干性的双光频梳光源^[41]。图6展示了通过连续激光器的光学参量放大(Optical Parameter Amplifier, OPA)产生光调制光频梳的原理图。种子信号激光器采用窄线宽的连续激光器,被飞秒脉冲激光器脉冲化和泵浦放大,此时飞秒脉冲激光器充当宽带光调制器。基于连续激光注入的OPA具有良好的偏振特性和长期功率稳定性,其优越的增益和噪声动力学已经被证明^[51-52]。而且,在纯光学二阶非线性

图6 光调制DCS测量系统^[41]Fig.6 Optical-optical modulation dual-comb spectroscopy measurement system^[41]

性参量过程中, 输出光脉冲与连续信号激光器保持良好的相干性^[53]。通过OPA过程产生的频率梳, 其中一根梳齿自动具有了与作为信号输入的连续激光器完全一致的稳定频率。因此, 不需要任何主动拍频探测和锁定过程, 产生的光频梳就可以被动锁定到连续激光器上。在光调制DCS系统中, OPA量子转换效率可达25%, 输出脉冲具有良好的输出功率和脉冲质量, 有利于非线性DCS应用^[29, 54]。更重要的是, 光调制DCS系统的互干性是通过OPA过程的内在机理和共用种子信号激光器来建立的, 只需要自由运行的飞秒振荡器和其重复频率参考射频时钟, 无需多余的参考和锁定手段。

光调制DCS测量系统的产生方式为拓展DCS系统工作波段提供了一种有效手段。目前, 量子级联激光器、带间级联激光器等半导体激光器已实现中红外波段覆盖。电光调制技术受到光纤工作波段的限制, 而光调制技术可以利用商用的2~5 μm 的中红外连续激光器, 实现中红外波段的DCS系统搭建。随着非线性晶体技术的发展, 可以预见这项技术极有可能拓展到远红外区域, 对DCS的应用发展产生深远的影响。

3 双光梳光谱系统的工作波段拓展

DCS测量的基本要求是光频率需要覆盖所需光谱范围。图7汇总了本文中提到的DCS系统的主要工作波段, 展示了DCS测量向着“全波段覆盖”发展的巨大潜力。

3.1 近红外双光梳光谱系统

得益于近红外光学器件已经普及的优势, 这一工作波段的光频梳方案最先得验证和完善。事实上, 到目前为止, 大多数DCS位于1550 nm通

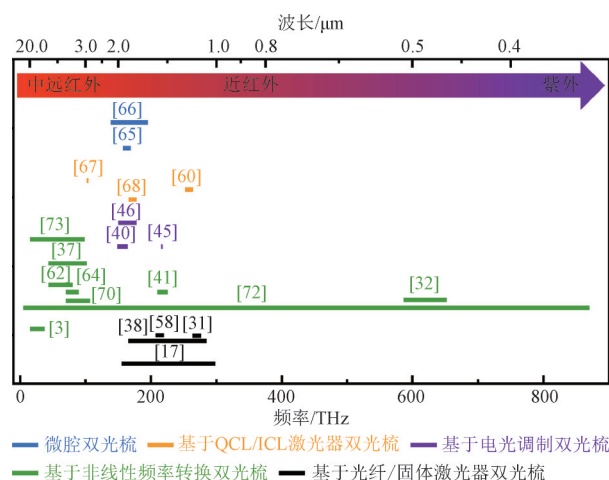
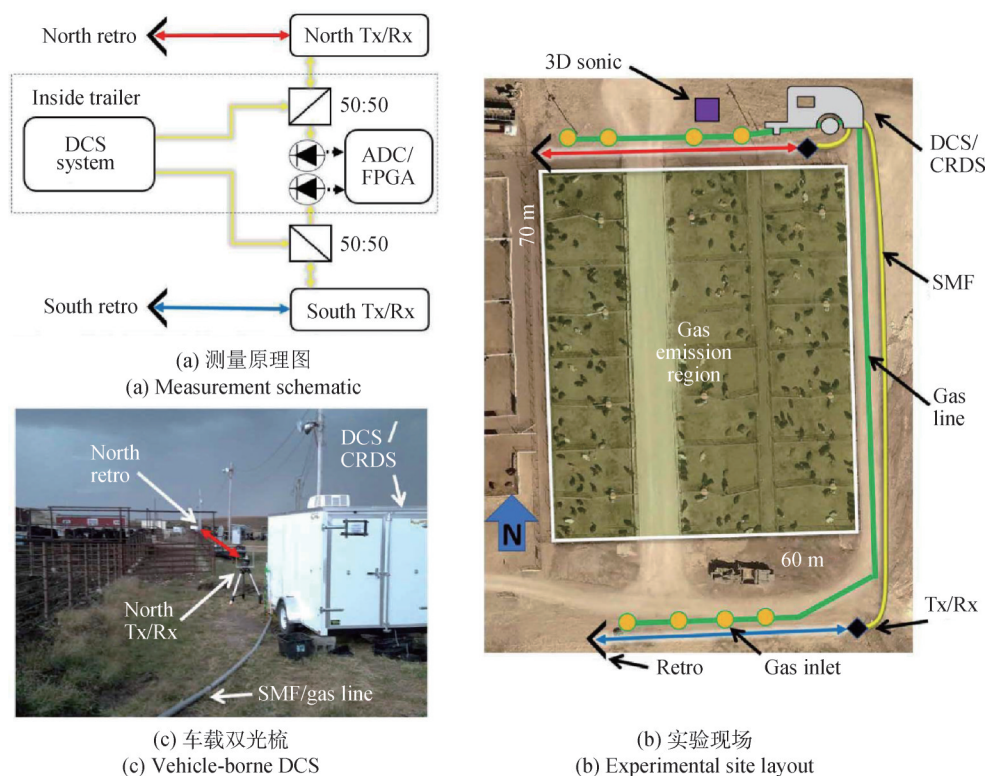


图7 DCS系统的光谱覆盖范围

Fig.7 Spectral coverage of dual-comb spectroscopy system

信频段的掺铒光纤频率梳, 该频段有着成熟的商业化的光纤器件和光电探测器。因此, 首台梳齿可分辨的高相干双光梳系统以及相位实时校正、自适应采样等双光梳相关的技术都是在近红外验证和发展起来的^[38, 41, 55]。此外, 基于近红外DCS系统的优秀性能, 越来越多的非线性光谱技术也得到进一步的发展, 如双光梳-光声光谱技术^[30]、双光梳-光热光谱技术^[56]等。

基于激光振荡器的光频梳的谱宽一般在几十纳米量级, 可以利用高非线性光纤实现其光谱展宽。Zhu Z. W.^[58]和Okubo S.等人^[17]利用色散管理和脉冲在非线性光纤中的光谱演化, 在掺铒光纤激光器中实现了覆盖1~2.2 μm 的一个倍频程超连续谱展宽。此方式提供的宽带光谱覆盖大量碳氢化合物、氮氧化合物分子的振转跃迁谱线, 可以应用于大气中的痕量分子探测, 如甲烷、二氧化碳和水等。基于这类方案的近红外DCS已被应用于气相分子谱线的精确测量^[38]和室外开放路径

图8 近红外DCS用于室外开放路径气体测量实验原理及现场^[57]Fig.8 Experimental setup and site layout of open-path gas measurement with near-IR DCS^[57]

的痕量气体检测^[57, 59]。图8(a)展示了室外开放路径气体测量原理图,实验现场如图8(b)所示,实验中采用的DCS系统已可搭载于车载平台,如图8(c)所示。同时,近红外光频梳还常常作为基础光源,通过非线性频率转换的方法,进一步向紫外、可见光、中红外甚至远红外波段拓展。

3.2 中红外和远红外双光梳光谱系统

中红外和远红外光谱区域($3 \sim 13 \mu\text{m}$)被称为指纹光谱区,在此光谱区域许多重要分子存在较强的特征振动谱线,因此成为分子光谱学最感兴趣的光谱区域之一。在这一波段,许多分子表现出较近红外高3个数量级以上的吸收系数^[60]。然而受增益介质的限制,将光梳光谱技术拓展到中红外和远红外光谱区域往往需要借助非线性光学器件,如光参量振荡器^[61, 62]、差频产生(Difference Frequency Generation, DFG)源^[63]、光参量放大器^[64]、芯片级微谐振器^[65-66]、带间级联激光器(Interband Cascade Lasers, ICLs)、量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCLs)^[67-68]和超连续宽频源^[69]等。此处主要介绍基于非线性频率转换实现的中红外及远红外DCS系统。

光参量振荡是产生大范围连续波长可调激光的首选方法,具有结构简单、调谐范围大、转换效率高的优势。Vodopyanov K. L. 课题组^[61]将掺铋光纤光频梳作为光源注入到长 0.5 mm ,以OP-GaAs为非线性增益介质的光参量振荡腔中,实现了 $2.6 \sim 7.5 \mu\text{m}$ 的瞬时光谱范围输出,光源的中心波长为 $1.93 \mu\text{m}$,重复频率为 115 MHz ,脉冲宽度为 90 fs ,平均功率为 300 mW 。基于该光频梳的宽带中红外DCS系统参考至原子钟,具有高互干性,其相对梳齿线宽为 35 mHz 。利用该系统,研究人员以十亿分之一灵敏度和亚多普勒光谱分辨率突破性地完成了对22种微量气体混合物的并行检测,包括同位素 ^{13}C , ^{18}O , ^{17}O , ^{15}N , ^{34}S , ^{33}S 和 ^2H ^[62]。

基于光参量放大的光频梳技术是实现非线性频率转换的有力手段。2020年,李文雪课题组^[41]实现了工作在 1550 nm 通信波段的DCS系统,该系统具有良好的无源互干性,相干时间可达 100 s 。随后,该课题组基于连续带间级联激光器和量子级联激光器的光参量放大过程,成功研制了工作在 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ 波段的高互干性的中红外DCS光谱仪,其工作波段连续可调。通过对 C_2H_2 , CH_4 , H_2CO ,

H₂S, COS, H₂O等混合气体的并行光谱测量,验证了该光谱测量系统的稳定性和紧凑性优势。图9(a)和图9(b)分别展示了该系统测量得到的模式分辨的气体吸收线以及单个射频梳齿,表明了DCS系统的梳齿可分辨能力^[64]。

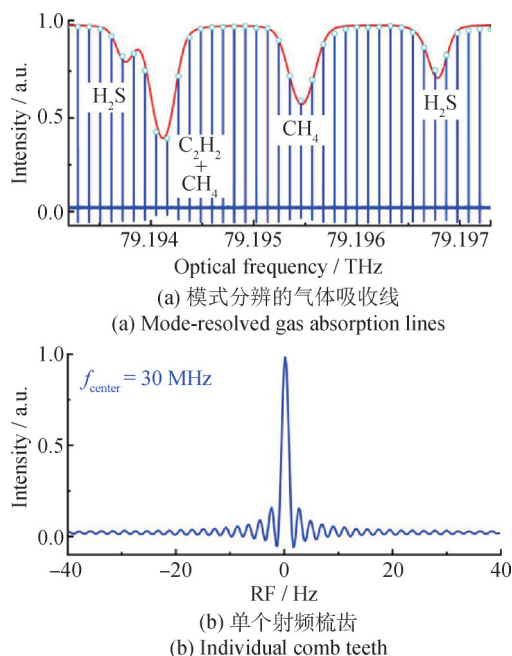


图9 基于光参量放大的双光梳测量结果^[63]

Fig.9 Experimental results from dual-comb spectroscopy based on optical parametric amplification^[63]

非线性差频的产生是实现宽带中红外DCS光源的重要方案,将近红外光频梳经非线性差频过程直接转换至中红外波段的同时保持其高度一致的相干性。2017年, Picque N. 团队^[70]首次使用电光调制近红外DCS系统结合非线性差频过程,将工作波长范围扩展到中红外波段。虽然直接输出的光谱范围受到电光调制器(Electro-Optic Modulators, EOMs)的带宽限制,但是其频率敏感和光谱范围平坦的特性引起了人们的广泛关注。2020年, Diddams S. A. 团队^[63]基于差频方案调谐实现了覆盖3.5~5.5 μm的中红外DCS系统,其单次光谱范围超过11 THz,光谱分辨力高达0.003 cm⁻¹。2020年,李文雪团队^[71]结合非线性啁啾晶体,实现了2.56~5.30 μm的宽带差频光谱,展示了差频方案在宽带中红外光源领域的应用潜力。2021年, Diddams S. 团队^[72]结合PPLN, GaSe和CdSiP₂三种非线性增益介质,实现了光梳

系统对0.35~22.5 μm的宽带光谱覆盖。随后在2022年,基于商用的1 GHz, 1.56 μm光频梳,利用PPLN和OP-GaP非线性晶体产生了覆盖3~13 μm光谱的光梳输出,为开启超宽带红外光梳光谱学研究打下基础^[73]。

3.3 太赫兹双光梳光谱系统

随着工作波段增加,DCS系统进入太赫兹光谱区域。太赫兹DCS系统通常采用钛蓝宝石或光纤光频梳来驱动光导天线发射宽带太赫兹光频梳,该技术消除了载波包络偏移频率避免了载波包络相位偏移频率的复杂锁定过程,并且长波长使系统具有更高的稳定性。在太赫兹波段中,DCS探测等效于太赫兹时域光谱或异步光学采样光谱,其具备绝对频率精度、梳齿可分辨和基于长时平均的高信噪比等特性,成为研究窄带分子吸收特征的重要手段。目前,太赫兹波段的DCS的发展已较为完备, Menlo System公司已出售成熟的太赫兹光频梳产品^[74]。

4 结论

光频梳以高分辨力、高频率精度和宽光谱覆盖范围等特性,成为宽带精密光谱学的理想光源。DCS技术充分发挥这些技术优势,采用单个光电探测器即可实现梳齿可分辨的宽带光谱快速探测。同时,DCS系统的工作波段也拓展至基本覆盖紫外到中红外波段,THz波段相关研究成果也不断涌现。

目前,中远红外光频梳在信噪比、相干性和稳定性等方面的性能还未达到近红外光频梳表现出的性能,但是相信在不远的未来,DCS的技术优势同样会在中远红外波段得到充分应用。尤其是超宽带中远红外光频梳光源的产生,将有力促进DCS测量技术革新,有望逐步取代传统光谱测量技术,成为高精度中红外快速光谱分析的关键技术。随着光频梳光源和技术的不断发展,DCS系统的应用波段将进一步的拓展,其必将成为最实用的精密光谱学工具之一,实现野外移动等多场景的精密光谱探测应用。

参考文献

- [1] DIDDAMS S A, HOLLBERG L, MBELE V. Molecular fingerprinting with the resolved modes of a femtosecond laser

- frequency comb[J]. *Nature*, 2007, 445(7128): 627 – 630.
- [2] SCHIBLI T, HARTL I, YOST D, et al. Optical frequency comb with submillihertz linewidth and more than 10 W average power[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(6): 355 – 359.
- [3] SCHLIESSER A, BREHM M, KEILMANN F, et al. Frequency - comb infrared spectrometer for rapid, remote chemical sensing[J]. *Optics Express*, 2005, 13(22): 9029 – 9038.
- [4] HÄNSCH T W. Nobel lecture: passion for precision[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1297.
- [5] HALL J L. Nobel lecture: defining and measuring optical frequencies[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1279.
- [6] BARTELS A, GEBS R, KIRCHNER M S, et al. Spectrally resolved optical frequency comb from a self-referenced 5 GHz femtosecond laser[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(17): 2553 – 2555.
- [7] BREHM M, SCHLIESSER A, KEILMANN F. Spectroscopic near-field microscopy using frequency combs in the mid-infrared[J]. *Optics Express*, 2006, 14(23): 11222 – 11233.
- [8] RUTKOWSKI L, MORVILLE J. Broadband cavity-enhanced molecular spectra from Vernier filtering of a complete frequency comb [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(23): 6664 – 6667.
- [9] ADLER F, THORPE M J, COSSEL K C, et al. Cavity-enhanced direct frequency comb spectroscopy: technology and applications[J]. *Annual Review of Analytical Chemistry*, 2010, 3(1): 175.
- [10] JOHANSSON A C, WESTBERG J, WYSOCKI G, et al. Optical frequency comb Faraday rotation spectroscopy [J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(5): 1 – 8.
- [11] NEWBURY N R, CODDINGTON I, SWANN W. Sensitivity of coherent dual-comb spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 7929 – 7945.
- [12] FERDOUS F, LEAIRD D E, HUANG C B, et al. Dual-comb electric-field cross-correlation technique for optical arbitrary waveform characterization [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(24): 3875 – 3877.
- [13] ZHANG Z, GU C, SUN J, et al. Asynchronous midinfrared ultrafast optical parametric oscillator for dual-comb spectroscopy[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(2): 187 – 189.
- [14] FOLTYNOWICZ A, BAN T, MASŁOWSKI P, et al. Quantum - noise - limited optical frequency comb spectroscopy [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(23): 233002.
- [15] LIU T W, WU C M, HSU Y C, et al. Dual Ti: sapphire comb lasers by a fiber laser pumping scheme and a hand-sized optical frequency reference[J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(2): 699 – 705.
- [16] CODDINGTON I, SWANN W C, NEWBURY N R. Coherent multiheterodyne spectroscopy using stabilized optical frequency combs[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(1): 013902.
- [17] OKUBO S, IWAKUNI K, INABA H, et al. Ultra - broadband dual - comb spectroscopy across 1.0~1.9 μm [J]. *Applied Physics Express*, 2015, 8(8): 082402.
- [18] VON RIBBECK H G, BREHM M, VAN DER WEIDE D W, et al. Spectroscopic THz near-field microscope[J]. *Optics Express*, 2008, 16(5): 3430 – 3438.
- [19] BAUMANN E, GIORGETTA F R, SWANN W C, et al. Spectroscopy of the methane ν_3 band with an accurate midinfrared coherent dual-comb spectrometer[J]. *Physical Review A*, 2011, 84(6): 062513.
- [20] ZOLOT A M, GIORGETTA F R, BAUMANN E, et al. Broad-band frequency references in the near-infrared: Accurate dual comb spectroscopy of methane and acetylene [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 118: 26 – 39.
- [21] GODBOUT M, DESCHêNES J D, GENEST J. Spectrally resolved laser ranging with frequency combs [J]. *Optics Express*, 2010, 18(15): 15981 – 15989.
- [22] BOUDREAU S, LEVASSEUR S, PERILLA C, et al. Chemical detection with hyperspectral lidar using dual frequency combs[J]. *Optics Express*, 2013, 21(6): 7411 – 7418.
- [23] 武腾飞, 韩继博, 白毓, 等. 双光梳绝对距离测量实验研究[J]. *计测技术*, 2022, 42(3): 50 – 55.
- WU T F, HAN J B, BAI Y, et al. Research on absolute distance measurement experiment of double optical comb[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2022, 42(3): 50 – 55. (in Chinese)
- [24] RIEKER G B, GIORGETTA F R, SWANN W C, et al. Frequency - comb - based remote sensing of greenhouse gases over kilometer air paths[J]. *Optica*, 2014, 1(5): 290 – 298.
- [25] ZHU F, BICER A, ASKAR R, et al. Mid-infrared dual frequency comb spectroscopy based on fiber lasers for the detection of methane in ambient air[J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12(9): 095701.
- [26] GIORGETTA F R, RIEKER G B, BAUMANN E, et al. Broadband phase spectroscopy over turbulent air paths [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(10): 103901.
- [27] ASAHARA A, MINOSHIMA K. Development of ultrafast

- time-resolved dual-comb spectroscopy [J]. APL Photonics, 2017, 2(4): 041301.
- [28] ABBAS M A, PAN Q, MANDON J, et al. Time-resolved mid-infrared dual-comb spectroscopy [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1 – 9.
- [29] IDEGUCHI T, HOLZNER S, BERNHARDT B, et al. Coherent Raman spectro-imaging with laser frequency combs [J]. Nature, 2013, 502(7471): 355 – 358.
- [30] WILDI T, VOUMARD T, BRASCH V, et al. Photo-acoustic dual-frequency comb spectroscopy [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1 – 6.
- [31] BERNHARDT B, OZAWA A, JACQUET P, et al. Cavity-enhanced dual-comb spectroscopy [J]. Nature Photonics, 2010, 4(1): 55 – 57.
- [32] MEEK S A, HIPKE A, GUELACHVILI G, et al. Doppler-free Fourier transform spectroscopy [J]. Optics Letters, 2018, 43(1): 162 – 165.
- [33] CODDINGTON I, NEWBURY N, SWANN W. Dual-comb spectroscopy [J]. Optica, 2016, 3(4): 414 – 426.
- [34] CODDINGTON I, SWANN W, NEWBURY N. Coherent dual-comb spectroscopy at high signal-to-noise ratio [J]. Physical Review A, 2010, 82(4): 043817.
- [35] FRIEDLEIN J T, BAUMANN E, BRIGGMAN K A, et al. Dual-comb photoacoustic spectroscopy [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1 – 10.
- [36] NEWBURY N R, SWANN W C. Low-noise fiber-laser frequency combs [J]. Journal of the Optical Society of America, B. Optical Physics, 2007, 24(8): 1756 – 1770.
- [37] YCAS G, GIORGETTA F R, BAUMANN E, et al. High-coherence mid-infrared dual-comb spectroscopy spanning 2.6 to 5.2 μm [J]. Nature Photonics, 2018, 12(4): 202 – 208.
- [38] CHEN Z, YAN M, HÄNSCH T W, et al. A phase-stable dual-comb interferometer [J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 1 – 7.
- [39] GIORGETTA F, CODDINGTON I, BAUMANN E, et al. Fast high-resolution spectroscopy of dynamic continuous-wave laser sources [J]. Nature Photonics, 2010, 4(12): 853 – 857.
- [40] MILLOT G, PITOIS S, YAN M, et al. Frequency-agile dual-comb spectroscopy [J]. Nature Photonics, 2016, 10(1): 27 – 30.
- [41] GU C L, ZUO Z, LUO D P, et al. Passive coherent dual-comb spectroscopy based on optical-optical modulation with free running lasers [J]. Photonix, 2020, 1: 1 – 9.
- [42] SCHILLER S. Spectrometry with frequency combs [J]. Optics Letters, 2002, 27(9): 766 – 768.
- [43] LONG D A, FLEISHER A J, DOUGLASS K O, et al. Multi-heterodyne spectroscopy with optical frequency combs generated from a continuous-wave laser [J]. Optics Letters, 2014, 39(9): 2688 – 2690.
- [44] CODDINGTON I, SWANN W C, NEWBURY N R. Time-domain spectroscopy of molecular free-induction decay in the infrared [J]. Optics Letters, 2010, 35(9): 1395 – 1397.
- [45] TELEANU E L, DURÁN V. Electro-optic dual-comb interferometer for high-speed vibrometry [J]. Optics Express, 2017, 25(14): 16427 – 16436.
- [46] ZHANG X, ZHANG J, YIN K, et al. Sub-100 fs all-fiber broadband electro-optic optical frequency comb at 1.5 μm [J]. Optics Express, 2020, 28(23): 34761 – 34771.
- [47] ZHAO X, HU G, ZHAO B, et al. Picometer-resolution dual-comb spectroscopy with a free-running fiber laser [J]. Optics Express, 2016, 24(19): 21833 – 21845.
- [48] LI B, XING J, KWON D, et al. Bidirectional mode-locked all-normal dispersion fiber laser [J]. Optica, 2020, 7(8): 961.
- [49] ZHAO K, LI Y, XIAO X, et al. Nonlinear multimode interference-based dual-color mode-locked fiber laser [J]. Optics Letters, 2020, 45(7): 1655 – 1658.
- [50] DENG Z, LIU Y, OUYANG C, et al. Mutually coherent dual-comb source generated from a free-running linear fiber laser [J]. Results in Physics, 2019, 14: 102364.
- [51] MANZONI C, CIRMI G, BRIDA D, et al. Optical-parametric-generation process driven by femtosecond pulses: timing and carrier-envelope phase properties [J]. Physical Review A, 2009, 79(3): 033818.
- [52] LINNENBANK H, STEINLE T, GIESSEN H. Narrowband cw injection seeded high power femtosecond double-pass optical parametric generator at 43 MHz: gain and noise dynamics [J]. Optics Express, 2016, 24(17): 19558 – 19566.
- [53] CHEN W, FAN J, GE A, et al. Intensity and temporal noise characteristics in femtosecond optical parametric amplifiers [J]. Optics Express, 2017, 25(25): 31263 – 31272.
- [54] LOMSADZE B, SMITH B C, CUNDIFF S T. Tri-comb spectroscopy [J]. Nature Photonics, 2018, 12(11): 676 – 680.
- [55] IDEGUCHI T, POISSON A, GUELACHVILI G, et al. Adaptive real-time dual-comb spectroscopy [J]. Nature Communications, 2014, 5(1): 1 – 8.
- [56] WANG Q, WANG Z, ZHANG H, et al. Dual-comb photo-thermal spectroscopy [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 2181.
- [57] HERMAN D I, WEERASEKARA C, HUTCHERSON L

- C, et al. Precise multispecies agricultural gas flux determined using broadband open-path dual-comb spectroscopy [J]. *Science Advances*, 2021, 7(14): 9765.
- [58] ZHU Z, LIU Y, LUO D, et al. Tunable optical frequency comb from a compact and robust Er: fiber laser [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2020, 8(2): 6.
- [59] COSSEL K C, WAXMAN E M, GIORGETTA F R, et al. Open-path dual-comb spectroscopy to an airborne retro-reflector [J]. *Optica*, 2017, 4(7): 724 – 728.
- [60] LINK S M, MAAS D, WALDBURGER D, et al. Dual-comb spectroscopy of water vapor with a free-running semiconductor disk laser [J]. *Science*, 2017, 356(6343): 1164 – 1168.
- [61] SMOLSKI V, YANG H, GORELOV S, et al. Coherence properties of a 2.6–7.5 μm frequency comb produced as a subharmonic of a Tm-fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1388 – 1391.
- [62] MURAVIEV A, SMOLSKI V, LOPARO Z, et al. Massively parallel sensing of trace molecules and their isotopologues with broadband subharmonic mid-infrared frequency combs [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(4): 209 – 214.
- [63] LIND A J, KOWLIGY A, TIMMERS H, et al. Mid-infrared frequency comb generation and spectroscopy with few-cycle pulses and $\chi^{(2)}$ nonlinear optics [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(13): 133904. 1 – 133904. 6.
- [64] ZUO Z, GU C, PENG D, et al. Broadband mid-infrared molecular spectroscopy based on passive coherent optical-modulated frequency combs [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(7): 1358 – 1368.
- [65] DUTT A, JOSHI C, JI X, et al. On-chip dual-comb source for spectroscopy [J]. *Science Advances*, 2018, 4(3): e1701858.
- [66] YU M, OKAWACHI Y, GRIFFITH A G, et al. Silicon-chip-based mid-infrared dual-comb spectroscopy [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1869.
- [67] STERCZEWSKI L A, BAGHERI M, FREZ C, et al. Mid-infrared dual-comb spectroscopy with room-temperature bi-functional interband cascade lasers and detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(14): 141102.
- [68] VILLARES G, HUGI A, BLASER S, et al. Dual-comb spectroscopy based on quantum-cascade-laser frequency combs [J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 1 – 9.
- [69] MARANDI A, RUDY C W, PLOTNICHENKO V G, et al. Mid-infrared supercontinuum generation in tapered chalcogenide fiber for producing octave-spanning frequency comb around 3 μm [J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24218 – 24225.
- [70] CHEN Z, HÄNSCH T W, PICQUÉ N. Mid-infrared feed-forward dual-comb spectroscopy [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(9): 3454 – 3459.
- [71] ZHOU L, LIU Y, LOU H, et al. Octave mid-infrared optical frequency comb from Er: fiber-laser-pumped aperiodically poled Mg: LiNbO₃ [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(23): 6458 – 6461.
- [72] LESKO D M B, TIMMERS H, XING S, et al. A six-octave optical frequency comb from a scalable few-cycle erbium fibre laser [J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(4): 281 – 286.
- [73] HOGHOOGHI N, XING S, CHANG P, et al. Broadband 1 GHz mid-infrared frequency comb [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 1 – 7.
- [74] MENLO SYSTEMS. 光学频率梳, 超稳激光器, 太赫兹系统和超快光纤激光器产品介绍 [Z]. <https://www.menlosystems.com/cn/products>.
MENLO SYSTEMS. Product introduction of optical frequency comb, ultra-stable laser, terahertz system and ultra-fast fiber laser [Z]. <https://www.menlosystems.com/cn/products>. (in Chinese)

(本文编辑: 朱俊真)



第一作者: 汤璐璐 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为飞秒激光测量技术。



通讯作者: 顾澄琳 (1984—), 男, 副研究员, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为超快光学和精密光谱学。