

# 单腔双光梳技术

赵欣\*, 杨建军, 张力钊, 郑铮

北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083

**摘要** 双光梳技术作为一种新型高分辨率、宽带光学测量技术,在气体吸收监测、绝对距离测量、泵浦探测、电磁频谱测量等领域中有重要应用。以低复杂度产生高质量的双光频梳是该技术走向现场检测、取得更广泛应用的关键瓶颈之一。以一台激光器实现高相干双光频梳生成的单腔双光梳技术的出现显著地推动了低复杂度双光梳测量技术的发展,成为了当前光频梳技术研究的重要方向。在这一新技术体系的产生与发展过程中,我国研究团队发挥了重要作用。回顾了近十年来单腔双光梳,特别是目前得到最多研究与应用的单腔双光梳光纤激光技术的发展历程,全面综述了单腔双光梳的多种技术路径及其特点,并对其未来发展趋势进行了分析和展望。

**关键词** 激光器;单腔双光梳;光频梳;双光梳;光纤激光器

**中图分类号** TN248

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.1901003

## 1 引言

光学频率梳,简称光频梳,在时域上表现为一系列在时间上呈严格周期性的超短飞秒脉冲;在频域上表现为一系列频率间隔相等、位置固定、覆盖宽光谱范围的窄线宽谱线。20 世纪 90 年代发展起来的光频梳技术,作为频率上的标尺成为连接微波与光频的“桥梁”,在实现时间和频率高精度计量方面发挥了重要作用<sup>[1]</sup>。在光频梳技术迅速发展的基础上,2002 年,德国的 Schiller<sup>[2]</sup>使用相位锁定的两台独立锁模激光器实现了光谱测量,首次提出了“双光梳”的概念。

与直接对单个光频梳信号进行测量相比,双光梳大幅降低了信号检测所需的设备带宽和响应速度,因此可以利用比较简单的信号采集和处理系统实现大带宽、高分辨率、快速的光域精密测量,这拓展了光频梳技术的应用范围,进一步推进了光频梳技术的发展与应用。近十几年来,双光梳技术被应用到光谱学测量<sup>[3]</sup>、绝对频率测量<sup>[4]</sup>、距离测量<sup>[5]</sup>、泵浦探测<sup>[6]</sup>等精密测量领域中。利用双光梳实现精密测量的机理是从传统傅里叶变换光谱学测量技术衍变而来的双光梳异步采样原理<sup>[2]</sup>。双光梳异步采样的过程如下:在两套重复频率稍有差别的光频梳(参考光梳与信号光梳)中,参考光梳以二者的重复频率之差( $\Delta f$ )为周期对信号光梳进行时域异步采样,在频域上等效为双光梳之间的多频下变频,从而可将高频光信号下变频到低频微波频段,最终以相对很低的测量带宽获得大带宽的

被测信号信息。

基于经典的光频梳技术,双光频梳是通过两个独立的、重复频率稍有差别的锁模激光器来获得的<sup>[2-3]</sup>,但是基于两个独立的锁模激光器构建的双光梳光源,需要反馈控制系统保证光频梳各自光频分量的高稳定性以实现双光梳之间的互相干性。因此复杂的光频梳反馈控制系统及其高昂的成本和苛刻的工作环境要求阻碍了双光频梳测量技术的现场应用和向低成本技术领域的推广。近十年来,国内外研究者针对如何以低系统复杂度产生高相干双光梳的问题开展了大量研究并给出了不同的方案。例如,利用同一个连续波激光信号通过不同频率的电光调制生成双光梳<sup>[7]</sup>。这种方法存在电子系统复杂、梳齿数量较少、功耗高、相噪性能受限等缺点。

单腔双光梳技术是近十年来兴起并快速发展的新兴低复杂度双光梳技术,引起了国内外研究者的广泛关注并得到了深入研究。本文对单腔双光梳技术及其应用研究进展进行了归纳总结。首先,介绍了单腔双光梳光源技术的产生背景、发展历程与最新研究进展;接着,对基于单腔双光梳技术的相关应用研究成果进行了介绍,并对单腔双光梳技术的一些最新发展方向进行了分析。

## 2 单腔双光梳生成方法

锁模激光技术是光频梳光源技术的基础。自诞生以来,超快激光技术的研究一直是以实现更短脉宽(更

收稿日期: 2022-05-27; 修回日期: 2022-07-05; 录用日期: 2022-08-30

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2800600)、国家自然科学基金(62127814)

通信作者: \*x.zhao@buaa.edu.cn

宽光谱)、更高功率为主要目标。而对传统稳频光频梳生成系统来说,同样需要其脉冲光源在谱宽、相噪等方面追求极致性能,因此实现高质量的单一脉冲序列的技术是必然的首选。相比之下,超快激光中的多脉冲振荡现象常常作为异常现象而被忽略或抑制,其实际的应用价值未被发现。

但双光梳技术的出现使得异步双脉冲序列间的互相关性(不仅是单个光梳自身的性能),成为核心技术指标,同时使得传统的光频梳技术的系统复杂度问题更加突出,这为探索双光梳光源技术的新范式提供了空间。单腔双光梳(SCDC)光源技术就是以牺牲一定

的单个脉冲序列性能来换取双脉冲序列间的固有互相关性的一条新技术途径。

在过去的十年间,以实现稳定的异步超短脉冲生成为目的,研究者打破原有锁模激光设计中的部分约束,通过长期探索,提出将“复用”概念引入到超快激光领域中的思路<sup>[8-11]</sup>。基于提出的复用锁模激光器( $M^2L^2$ )<sup>[9]</sup>的概念,从光波传输物理维度的视角,通过在腔内特定维度上的调控,打破了脉冲传输简并性,实现了异步超短脉冲的同时锁模。基于这一系统性设计与研究方法,构建了频-空-时-偏振等维度的单腔双光梳激光技术体系,如图 1 所示。

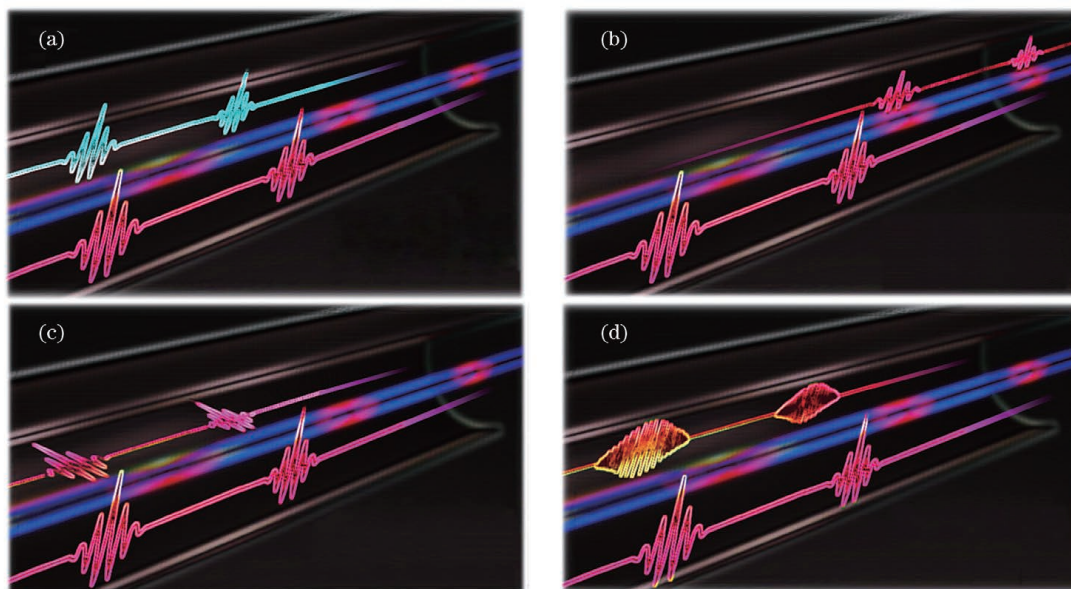


图 1 单腔双光梳生成方法。(a)波分复用;(b)方向复用;(c)偏振复用;(d)波形复用

Fig. 1 Generation methods for single-cavity dual combs. (a) Wavelength division multiplexing; (b) direction multiplexing; (c) polarization multiplexing; (d) pulse shape multiplexing

## 2.1 波长复用

为了获得更大的脉冲光谱宽度,传统锁模激光器设计往往希望腔内避免存在显著的光谱滤波效应。而波长复用锁模激光器则是通过在激光器内引入光谱滤波效应来实现不同中心波长、不同重复频率的脉冲的同时锁模,但仍需保证脉冲具有双光梳应用所需的足够的谱宽等性能。此类激光器是目前研究最多的单腔双光梳技术之一。

与其他类型的复用锁模激光器相比,多波长激光器得到了较多研究。在被动锁模光纤激光器研究的较早阶段,1992年英国南安普敦大学 Matsas 等<sup>[12]</sup>通过腔内残余的双折射效应,实现了 1.55 ps 的双波长脉冲输出。但受类似的多波长直流激光器研究思路的影响,研究者主要关注其在孤子通信系统中的潜在应用。1994年,英国帝国理工学院 Noske 等<sup>[13]</sup>通过在腔内引入法布里-珀罗(FP)腔与光纤光栅滤波器,实现了 8 字腔双波长与三波长 12 ps 的被动锁模,但并未关注脉冲的重复频率等其他特性。之后,面向潜在的波分复用光通信应用所需的同步多波长脉冲生成需求,更

多的研究转向了可以实现更高重复频率的主动锁模激光器。1996年,以色列理工学院 Margalit 等<sup>[14]</sup>将两个主动锁模激光器注入到同一个被动腔内,实现了两个双波长被动锁模的同步 10 ps 脉冲输出。随后十余年间,大量国际国内团队研究了 ps 脉宽、GHz 重复频率的双波长乃至多波长主动锁模脉冲生成,但主动锁模方式决定了各脉冲重复频率必须相同或为整倍数关系<sup>[15-19]</sup>。

21 世纪新加坡研究团队进一步对多波长被动锁模激光进行了持续的研究。2006年,新加坡信息通信研究所 Gong 等<sup>[20]</sup>通过非线性偏振旋转锁模的光纤环形腔内引入保偏光纤,实现了 1558 nm 和 1570 nm 双波长被动锁模,脉宽分别为 2.4 ps 和 2.1 ps,但认为产生的双波长脉冲具有一样的重复频率。2008年,新加坡南洋理工大学 Xie 等<sup>[21]</sup>基于半导体可饱和吸收镜(SESAM),在 Nd:CNGG 激光器中实现了 5 ps 脉冲双波长锁模,但是由于固体激光器的空间光路特点,输出为重复频率相同的同步脉冲。2009年,佛山大学 Chen 等<sup>[22]</sup>在环形腔内利用非线性偏振锁模技术

实现了 1560 nm 与 1601 nm 双波长锁模,但是受限于可用的工作光谱范围,脉冲宽度分别为 571 fs 与 28 ps,差异较大,且未进一步研究脉冲间的时域关系。2011 年,华南师范大学 Luo 等<sup>[23]</sup>分别基于非线性偏振旋转(NPR)锁模技术与 SESAM 技术,结合腔内双折射滤波,均实现了多波长 ps 脉冲的输出,波长间隔小于 4 nm,脉冲宽度约为 10 ps。上述研究虽然实现了双波长乃至多波长脉冲的生成,但未关注脉冲的重复频率特性,同时多个脉冲的光谱都集中在一个增益光谱区间内,产生的锁模光谱带宽严重受限,与双光梳应用的需求差距较大。2009 年,新加坡南洋理工大学 Zhang 等<sup>[24]</sup>在基于 SESAM 的正常色散光纤激光器中,利用激光器中的弱偏振相关性和器件双折射,实现了双波长耗散孤子脉冲输出,中心波长间距为 3 nm,脉冲宽度为 28.8 ps,发现了不同波长脉冲在时域上异步的时延特性并给出了基于色散的解释。

2011 年,本课题组首次提出了在环形掺铒光纤激光器内通过调节损耗来调控增益谱形状的方法,如图 2(a)所示,从而同时利用掺铒光纤的 1530 nm 与 1560 nm 两个光谱区域[图 2(b)],显著扩展了可能的脉冲光谱宽度,实现了稳定的双波长亚 ps 孤子脉冲输出。同时观测了双脉冲的重复频率,首次发现其具有稳定的频差,且与根据色散估算的结果相近,证实了异步脉冲的重复频率差与色散的关系<sup>[8]</sup>。其输出脉冲特性的显著改善和相对稳定的重复频率差,为后续提出

并开展的系列双光梳研究提供了关键条件。2016 年,为了进一步增强对光谱的控制能力,实现更稳定的双波长 fs 孤子脉冲输出,本课题组通过在环形掺铒光纤激光器内引入部分保偏光纤和偏振分束器,达到了将腔内增益谱调控与偏振干涉滤波相结合的效果[系统如图 2(c)所示],成功实现了光谱稳定、无 Kelly 边带的飞秒双波长锁模激光器<sup>[25]</sup>。同时,在无反馈控制而重复频率存在显著漂移的情况下,激光器的重复频率差的漂动仅为 16 mHz,其重复频率和重复频率差随时间的变化如图 2(d)所示。输出脉冲的互线宽低于重复频率差,表明双波长单腔双光梳光源具有良好的共模噪声抑制特性,有力地证明了单腔双光梳激光器不需要复杂的频率锁定系统即可保证两套光频梳之间的高相干性。实际应用中调控单腔双光梳增益谱需要更紧凑稳定的光纤滤波器,为了满足这个需求,本课题组利用多模干涉滤波器件实现了自启动的单腔双光梳生成<sup>[26]</sup>。在保偏双波长光源的探索方面,2018 年,本课题组在全保偏环形光纤腔内使用波片等元件实现了自启动保偏双波长单腔双光梳激光器,如图 3(a)所示<sup>[27]</sup>,其输出光谱如图 3(b)所示。为了进一步衡量单腔双光梳光源的稳定性,天津大学 Shi 等<sup>[28]</sup>研究了单腔双波长锁模激光器的相对时间抖动特性。测量结果表明,该双波长锁模脉冲的相对周期时间抖动约为 0.82 fs,与典型单波长孤子锁模光源的指标相近。

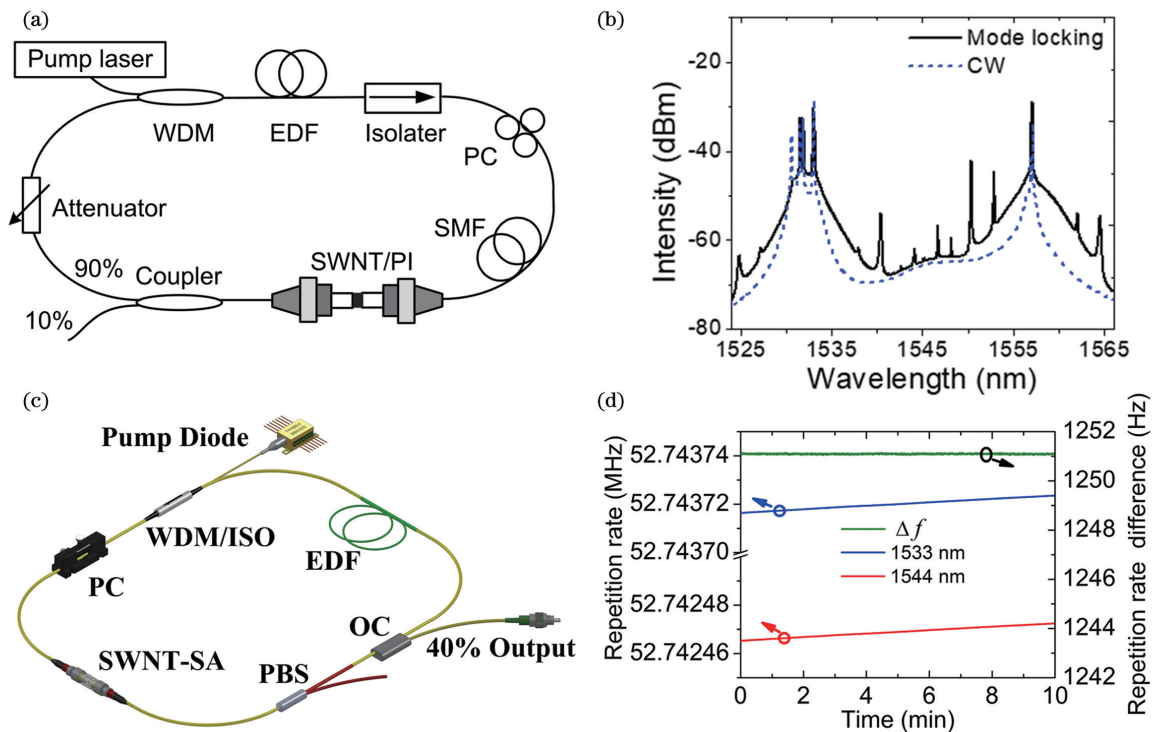


图 2 波长复用单腔双光梳。(a)基于损耗调控增益谱的单腔双光梳结构图<sup>[8]</sup>; (b)输出光谱<sup>[8]</sup>; (c)基于增益谱调控与偏振干涉滤波相结合的单腔双光梳结构图<sup>[25]</sup>; (d)重复频率与重复频率差的稳定性<sup>[25]</sup>

Fig. 2 Wavelength division multiplexing SCDCs. (a) Structural diagram of SCDCs based on loss-regulated gain spectrum profile tuning<sup>[8]</sup>; (b) output spectra<sup>[8]</sup>; (c) structural diagram of SCDCs based on combination of gain spectrum control and polarization interference filtering<sup>[25]</sup>; (d) stabilities of repetition frequency and repetition frequency difference<sup>[25]</sup>

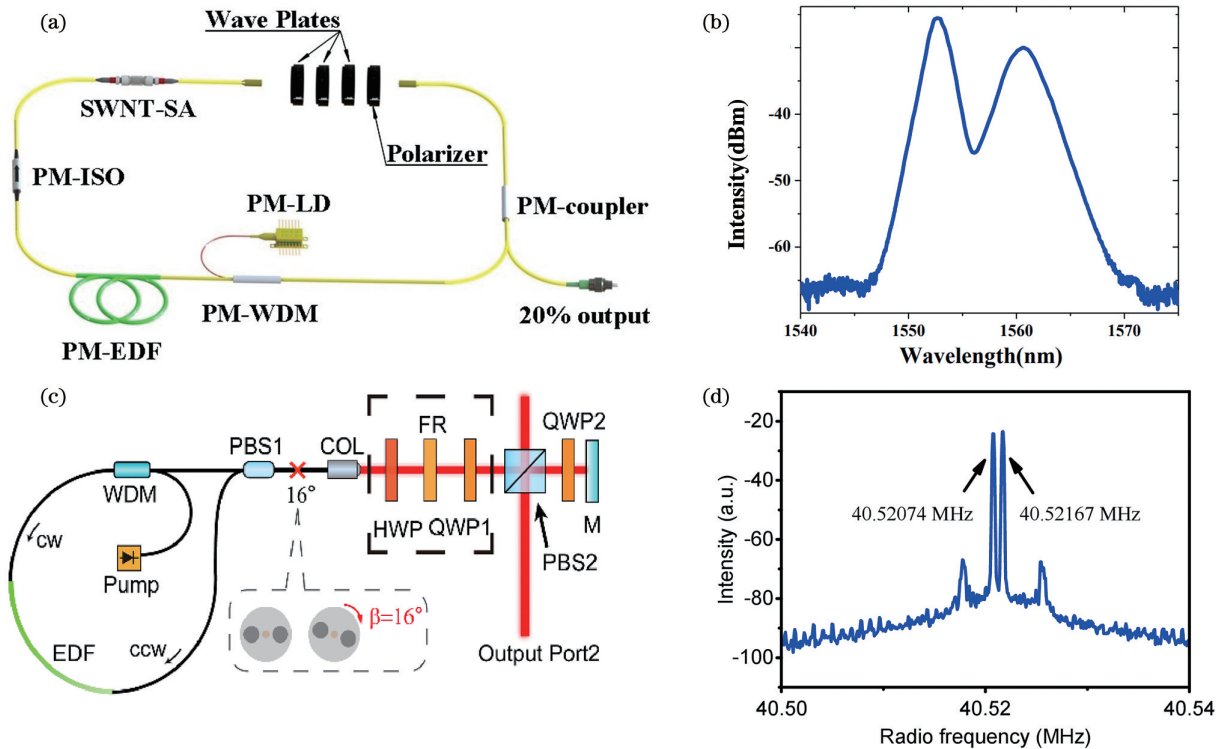


图 3 全保偏波长复用单腔双光梳。(a) 基于波片偏振干涉的全保偏单腔双光梳<sup>[27]</sup>; (b) 输出光谱<sup>[27]</sup>; (c) 基于 Sagnac 滤波的全保偏单腔双光梳<sup>[29]</sup>; (d) 输出光谱与重复频率差的稳定性<sup>[29]</sup>

Fig. 3 All-polarization-maintaining wavelength division multiplexing SCDCs. (a) All-polarization-maintaining SCDCs based on polarization interference using waveplates<sup>[27]</sup>; (b) output spectrum<sup>[27]</sup>; (c) all-polarization-maintaining SCDCs based on Sagnac filter<sup>[29]</sup>; (d) stabilities of output spectrum and repetition frequency difference<sup>[29]</sup>

后续国内外众多团队对波长复用单腔双光梳激光器开展了大量研究,丰富了波长复用单腔双光梳激光器的实现方式,促进了单腔双光梳技术的发展。为了拓展波长复用单腔双光梳的适用谱段,天津大学 Liao 等<sup>[30]</sup>利用非线性放大环形镜(NALM)的 Sagnac 滤波效应,搭建了“9”字型  $2\ \mu\text{m}$  掺铥锁模光纤激光器,实现了双波长输出;奥地利维也纳大学 Fellingner 等<sup>[31]</sup>利用空间光滤波器实现了掺镱双波长锁模光纤激光器;波兰弗罗茨瓦夫理工大学 Pawliszewska 等<sup>[32]</sup>在掺铥光纤激光器中实现了双波长锁模;华东师范大学 Guo 等<sup>[33]</sup>通过控制两个保偏准直器的对准角度与处在其中的四分之一波片,实现了  $1\ \mu\text{m}$  波长全光纤结构的双波长锁模。在全保偏或者部分保偏双波长锁模激光器方面,天津大学 Li 等<sup>[29]</sup>通过控制保偏光纤的焊接角度,结合 Sagnac 滤波效应,搭建了全保偏  $1.5\ \mu\text{m}$  双波长激光器,如图 3(c)所示,实现了 3 dB 带宽分别为 1.86 nm 和 2.49 nm 的双波长输出,重复频率差约为 930 Hz,如图 3(d)所示;日本丰田工业大学 Luo 等<sup>[34]</sup>将一段长约 0.9 m 的非保偏光纤与长约 4.6 m 的保偏腔熔接,利用 Lyot 滤波器设计了一种部分保偏的双波长锁模激光器;奥地利维也纳大学 Fellingner 等<sup>[35]</sup>利用空间光滤波器搭建了全保偏掺铥双波长锁模光纤激光器,其异步脉冲之间的重复频率差同时受色散与空间路径的共同影响。此外,针对波

长复用单腔双光梳激光器重复频率差的可调谐性等特征,研究者们也进行了详细的报道<sup>[33,36-37]</sup>。

## 2.2 方向复用

在以空间光路为主的激光器中,其光路结构容易形成双向振荡,因此早在 1967 年,美国斯坦福大学 Buholz 等<sup>[38]</sup>就发现了脉冲双向同时振荡的现象。1997 年美国新墨西哥大学 Bohn 等<sup>[39]</sup>针对激光陀螺应用,首次实现了钛宝石激光器双向飞秒脉冲锁模,并后续开展了多种优化和不同固体锁模激光平台上的双向锁模研究<sup>[40-43]</sup>。国内对此也多有研究,清华大学实现了 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光的双向飞秒锁模,并探讨了该激光器作为陀螺的性能<sup>[44]</sup>。

相比之下,在环形光纤激光器中,为了抑制空间烧孔等现象,常规情况下会使用光隔离器来实现腔内光的单向运转。2008 年美国亚利桑那大学 Kieu 等<sup>[45]</sup>通过去掉腔内光隔离器的方式,首次实现了基于碳纳米管可饱和吸收体的全光纤双向锁模激光器,如图 4(a)所示,生成的光脉冲宽度约为 600 fs 且中心波长相同,光谱如图 4(b)所示;发现了正、反向运转的脉冲存在 10 Hz 量级的重复频率差,并探讨了这一现象在陀螺应用中的意义。2010 年美国新墨西哥大学 Braga 等<sup>[46]</sup>则针对陀螺应用研究了在双向光纤锁模激光中抑制同步双向脉冲间死区形成的方法。为了避免双向脉冲间的竞争等效应,还出现了多种只共用部分光腔

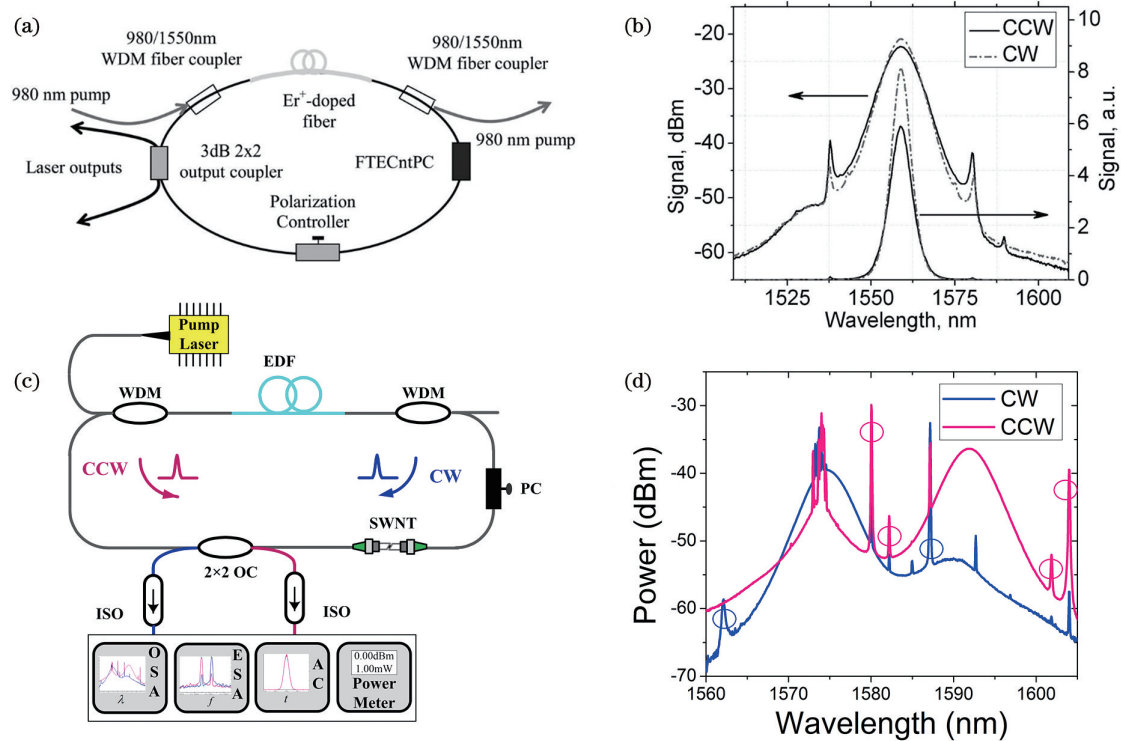


图 4 双向锁模激光器。(a) 双向单波长锁模激光器<sup>[45]</sup>；(b) 输出光谱<sup>[45]</sup>；(c) 双向双波长锁模激光器<sup>[9]</sup>；(d) 输出光谱<sup>[9]</sup>  
 Fig. 4 Bidirectional mode-locked laser. (a) Bidirectional single wavelength mode-locked laser<sup>[45]</sup>；(b) output spectra<sup>[45]</sup>；  
 (c) bidirectional dual-wavelength mode-locked laser<sup>[9]</sup>；(d) output spectra<sup>[9]</sup>

的双向光纤激光结构。2011 年新加坡南洋理工大学 Ouyang 等<sup>[47]</sup>使用四端口环形器与两个 SESAM, 实现了光纤激光器的双向锁模。2013 年中国科学院西安光学精密机械研究所 Cui 等<sup>[48-49]</sup>使用不同锁模器件实现了双向锁模激光器, 2014 年又实现了双向输出具有不同偏振特性的孤子锁模激光<sup>[50]</sup>。之后, 新加坡南洋理工大学 Liu 等<sup>[51]</sup>基于碳纳米管锁模器件, 使用四端口环形器实现了两个方向上的锁模切换, 还基于四端口环形器与两个石墨烯锁模器件实现了双向锁模<sup>[52]</sup>。

继双波长锁模激光器之后, 2014 年本课题组在对双向锁模激光器的研究中, 认识到可将这些看似截然不同的光源形式统一到不同传输维度上的“复用锁模激光器”概念上来, 提出了将“复用”引入到锁模激光腔设计中以实现异步双梳超短脉冲的思路<sup>[9]</sup>。在实验上, 实现了双向、双波长锁模激光, 通过调节腔内损耗实现了具有不同中心波长的双向锁模, 系统结构如图 4(c)所示, 其输出光谱如图 4(d)所示。与以往的完全共腔双向锁模激光相比, 可变重复频率差范围大大增加; 并利用脉冲波长差调控重复频率差, 首次指出了利用双向锁模激光器实现双光梳光源的可能性<sup>[9]</sup>。此后, 异步双光梳应用逐步成为双向锁模激光器的主要研究方向。

2016 年日本东京大学 Ideguchi 等<sup>[53]</sup>在钛蓝宝石激光器中产生了具有百 Hz 量级频差的双向锁模脉冲输出, 并获得了初步的双梳谱学信号。同年, 美国亚利桑那大学 Mehravar 等<sup>[54]</sup>利用双向锁模光纤激光器演

示了 1.5  $\mu\text{m}$  波段气体吸收峰的双梳光谱测量。为了进一步拓展方向复用单腔双光频梳的适用谱段, 美国亚利桑那大学 Olson 等<sup>[55]</sup>进行了 2  $\mu\text{m}$  波段激光器的双梳实验, 中国人民解放军国防科技大学 Li 等<sup>[56]</sup>也实现了 2  $\mu\text{m}$  双向锁模光纤激光器。为了提高单腔双光梳光纤光源的输出脉冲能量, 美国科罗拉多大学 Huang 等<sup>[57]</sup>设计了基于非线性偏振旋转锁模的双向全正常色散锁模脉冲激光器结构, 如图 5(a)所示, 使输出脉冲能量超过了 1 nJ。此外, 在方向复用单腔双光频梳生成机理和方法方面, 英国阿斯顿大学 Chernysheva 等<sup>[58]</sup>利用碳纳米管与非线性偏振旋转效应实现了双向锁模, 俄罗斯科学院光纤光学研究中心 Krylov 等<sup>[59]</sup>对具有分布式起偏结构的双向锁模光纤激光的生成机制进行了研究。

另一方面, 部分共腔结构的方向复用光源也得到了进一步发展, 使得方向复用单腔双光频梳光源在自启动、全保偏、重复频率差的可调谐性等方面获得了提升。日本电气通信大学 Nakajima 等<sup>[60]</sup>采用两个 SESAM 实现了一种基于非共享饱和吸收体的双向锁模激光器, 并使用自参考技术测量了其载波包络偏移频率( $f_{\text{ceo}}$ )特性, 如图 5(b)所示。加拿大麦吉尔大学 Kayes 等<sup>[61]</sup>通过两个环形器与一个 SESAM 相结合的方式实现了 1.9  $\mu\text{m}$  波段的双向锁模激光器。清华大学 Liu 等<sup>[62]</sup>设计了含有 4 个环形器、2 个法拉第旋转镜的基于非线性偏振旋转的全保偏双向锁模激光器。此外, 还有基于此类激光器实现不同孤子类型<sup>[63]</sup>

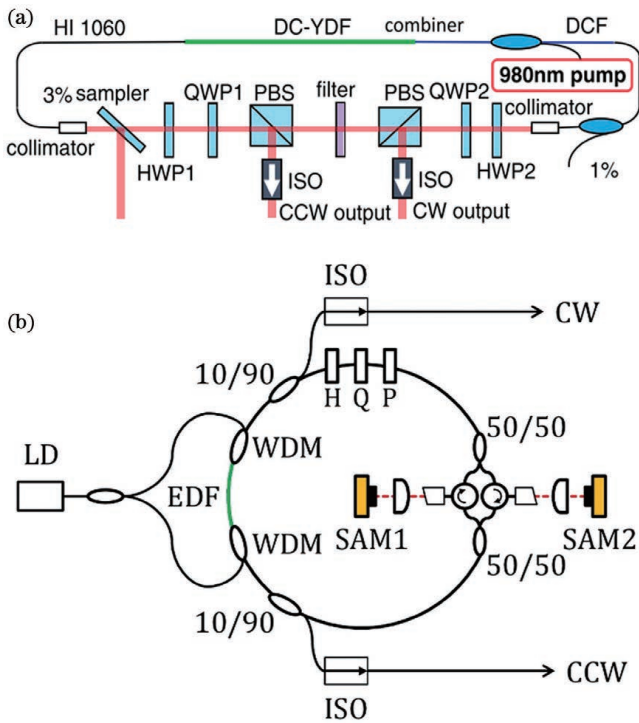


图 5 双向锁模激光器。(a) 高功率双向锁模激光器<sup>[57]</sup>；  
(b) 部分共腔双向结构的双向锁模激光器<sup>[60]</sup>  
Fig. 5 Bidirectional mode-locked laser. (a) High-power bidirectional mode-locked laser<sup>[57]</sup>； (b) partial co-cavity bidirectional mode-locked laser<sup>[60]</sup>

同时输出以及锁模过程的研究报道<sup>[64]</sup>。需要注意的是，虽然部分共腔结构在启动和锁模稳定性方面具有一定的便利，但非完全共享光腔的设计限制了双梳间

重复频率差的稳定性。光腔扰动对双梳信号的影响发生在部分共腔结构中，特别是互相独立的光路部分，影响难以相互抵消，因此以重复频率差稳定性为代表的性能随着激光器结构中非共腔部分的增加呈显著增强的趋势<sup>[25,60-61]</sup>，部分共腔结构光源在对互干性有更高要求的应用中面临较多的困难。

除了传统激光器，微腔光梳也是实现光频梳生成的另一种方法<sup>[65]</sup>。方向复用的方式还被推广到了微腔双光频梳生成方法中<sup>[66]</sup>，但由于光学微腔中的强非线性与互耦合作用，在其中产生稳定的双向光梳仍需要比较复杂的泵浦与控制系统。2019 年美国加州理工学院 Bao 等<sup>[67]</sup>在微环谐振腔中形成了两套稳定的克尔光梳。

### 2.3 偏振复用

传统的光纤锁模激光器结构全部由单模光纤构成或者保偏光纤构成。考虑到双折射可能引入的带宽限制等效应，前者希望在光腔中控制尽量低的双折射，而后者则要保持单一偏振态运转。

1987 年美国马里兰大学 Menyuk<sup>[68]</sup>首次在理论上证明在非线性互相位调制与双折射的共同作用下，包含正交偏振分量的孤子脉冲即矢量孤子也可以存在。各国研究团队在单模光纤构成的弱双折射锁模光纤激光器中，相继在实验中观察到了偏振锁定矢量孤子<sup>[69-70]</sup>、偏振旋转矢量孤子<sup>[71]</sup>等多种类型的矢量孤子。

2014 年，本课题组提出了部分双折射光纤锁模光腔结构<sup>[72]</sup>，如图 6(a) 所示。通过在单模光腔内引入

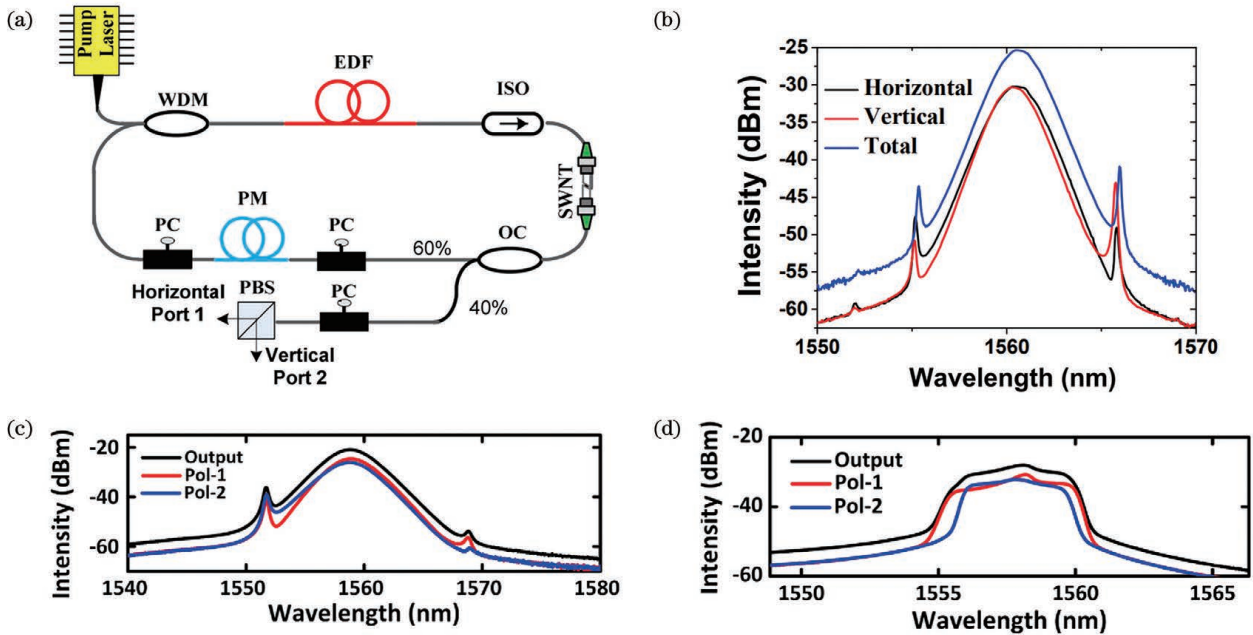


图 6 偏振复用单腔双光梳。(a) 包括部分双折射光纤的偏振复用单腔双光梳<sup>[72]</sup>；(b) 输出光谱<sup>[10]</sup>；(c) 偏振复用单腔双光梳在反常色散下的输出光谱<sup>[10]</sup>；(d) 偏振复用单腔双光梳在正常色散下的输出光谱<sup>[10]</sup>  
Fig. 6 Polarization multiplexing SCDCs. (a) Polarization-multiplexing SCDCs with birefringent fiber<sup>[72]</sup>； (b) output spectra<sup>[10]</sup>； (c) output spectra of polarization multiplexing SCDCs with anomalous dispersion<sup>[10]</sup>； (d) output spectra of polarization multiplexing SCDCs with normal dispersion<sup>[10]</sup>

一段具有显著双折射的保偏光纤,在打破偏振态简并的同时,利用单模激光腔仍能够支持不同偏振态的特点,基于非常简单的环形光腔结构,实现了便捷可靠的偏振复用单腔双光梳生成,稳定产生了两个具有不同重复频率、偏振正交的矢量孤子脉冲序列。其光谱基本互相重叠,如图 6(b)所示,因此无需非线性扩谱便可直接应用于双光梳测量。同时发现,双梳的重复频率差可通过调节腔内偏振态实现连续可调。随后,本课题组还分别演示了利用这一偏振复用双梳光源实现相干双梳测距<sup>[73]</sup>与光谱测量<sup>[74]</sup>的可行性。

随着 2016 年单腔双光梳激光在几个重要应用方面的成功突破,偏振复用锁模激光器迅速得到了研究者的更多关注。2017 年美国波士顿大学 Akosman 等<sup>[75]</sup>基于铽钛共掺光纤,采用直线腔结构实现了偏振复用,输出信号噪声与稳定性的测量结果表明,从同一个激光器输出的不同偏振锁模脉冲具有良好的共模抑制效果。2018 年本课题组进一步研究发现,前面提出的部分双

折射环形双梳光源结构在不同腔内色散下可以分别实现孤子和耗散孤子的偏振复用双梳生成,如图 6(b)、(c)所示,而且生成的脉冲均可产生具有较好质量的双梳光谱学信号<sup>[10]</sup>。2019 年波兰弗罗茨瓦夫理工大学 Sterczewski 等<sup>[76]</sup>基于这一光腔结构,实现了 140 MHz 的重复频率、几千赫兹的重复频率差和十几个小时的稳定连续工作时间,并进一步演示了双梳光谱学测量应用。

日本东京大学 Uyama 等<sup>[77]</sup>在环形腔中通过两次 90° 旋转焊接,平衡了两个偏振态之间的偏振模式色散,并提出了一种全保偏结构的偏振复用方案,如图 7(a)所示。除了上述全共腔偏振复用结构,2018 年美国堪萨斯大学 Vedala 等<sup>[79]</sup>将两个偏振态分开,并使用两个分立的饱和吸收体,实现了自启动偏振复用锁模光纤激光器。日本电气通信大学 Nakajima 等<sup>[78]</sup>采用 NALM 锁模的方法,实现了部分共腔的偏振复用的双光梳生成,如图 7(b)所示。

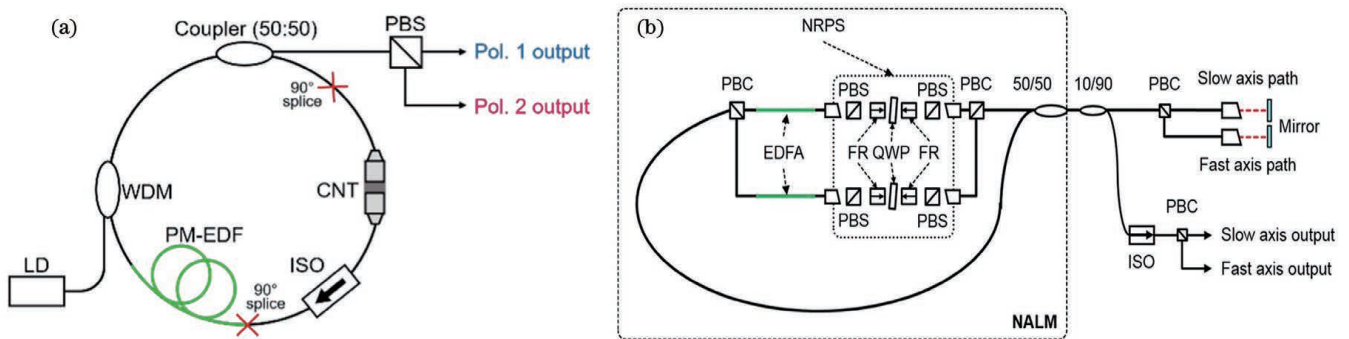


图 7 全保偏偏振复用单腔双光梳。(a)全保偏偏振复用单腔双光梳<sup>[77]</sup>; (b)基于 NALM 结构的部分共腔偏振复用单腔双光梳<sup>[78]</sup>  
Fig. 7 All-polarization-maintaining polarization multiplexing SCDCs. (a) All-polarization-maintaining polarization multiplexing SCDCs<sup>[77]</sup>; (b) partial co-cavity polarization multiplexing SCDCs based on NALM structure<sup>[78]</sup>

另一方面,与光纤腔相比,在其他以空间光路为主的光源中,比较容易实现的偏振复用结构近年来也得到了广泛的研究。2017 年瑞士苏黎世联邦理工学院 Link 等<sup>[80]</sup>使用外腔锁模面发射激光器输出的双偏振脉冲,实现了初步的水蒸气光谱学测量,如图 8(a)所示。同年,Liang 等<sup>[82]</sup>使用 Nd:YLF 晶体实现了可输出 1  $\mu\text{m}$  波段 ps 脉冲的偏振复用锁模固体激光器。2020 年瑞士苏黎世联邦理工学院 Willenberg 等<sup>[83]</sup>实现了 1  $\mu\text{m}$  波段偏振复用锁模 Yb:CaF<sub>2</sub> 固体激光器。2021 年波兰弗罗茨瓦夫理工大学 Kowalczyk 等<sup>[81]</sup>使用 Yb:CNGS 晶体同样实现了 1  $\mu\text{m}$  波段偏振复用锁模固体激光器,如图 8(b)所示。此类激光器具有重复频率较高、输出功率相对较高的特点。

## 2.4 脉冲波形复用

在另一个物理维度——时域上,在一个锁模光腔内同时产生具有不同时间域特征的异步超短脉冲更具挑战性。与其他几个物理维度的复用不同,这里需要通过进一步准确调控非线性效应下的脉冲生成机制,才能有效调节脉冲时域波形。

2016 年,本课题组提出了一种脉冲波形复用的双光梳锁模激光器结构<sup>[11]</sup>,如图 9(a)所示。该单模光纤激光器在物理饱和吸收体锁模器件的基础上,还引入了偏振相关损耗及部分保偏光纤尾纤的双折射。因此,在腔内由双折射与偏振相关损耗产生的 Lyot 滤波效应对脉冲带宽有压窄作用;起偏器与腔内非线性效应在足够的脉冲能量下可形成非线性偏振旋转效应,进而与物理锁模器件相结合,形成混合锁模机制,可扩展脉冲光谱,由此形成了脉冲能量相关的时域脉冲波形控制机制。因此,对于腔内能量较低的脉冲,前者起主要作用,此时锁模光谱较窄;对于腔内能量较大的脉冲,后者的作用凸显出来,使得锁模光谱显著加宽。激光器实现了同时生成具有不同能量和不同时域特性的超短脉冲,两种脉冲的输出光谱重叠,当中心波长具有一定偏移时,二者具有不同的重复频率。其输出光谱与频谱分别如图 9(b)与 9(c)所示,双梳拍频信号也证明了两种脉冲之间具有良好的互相干性。

对于目前研究最多的单腔双光梳光纤激光技术,表 1 总结了不同复用方式的光源的关键技术特点。

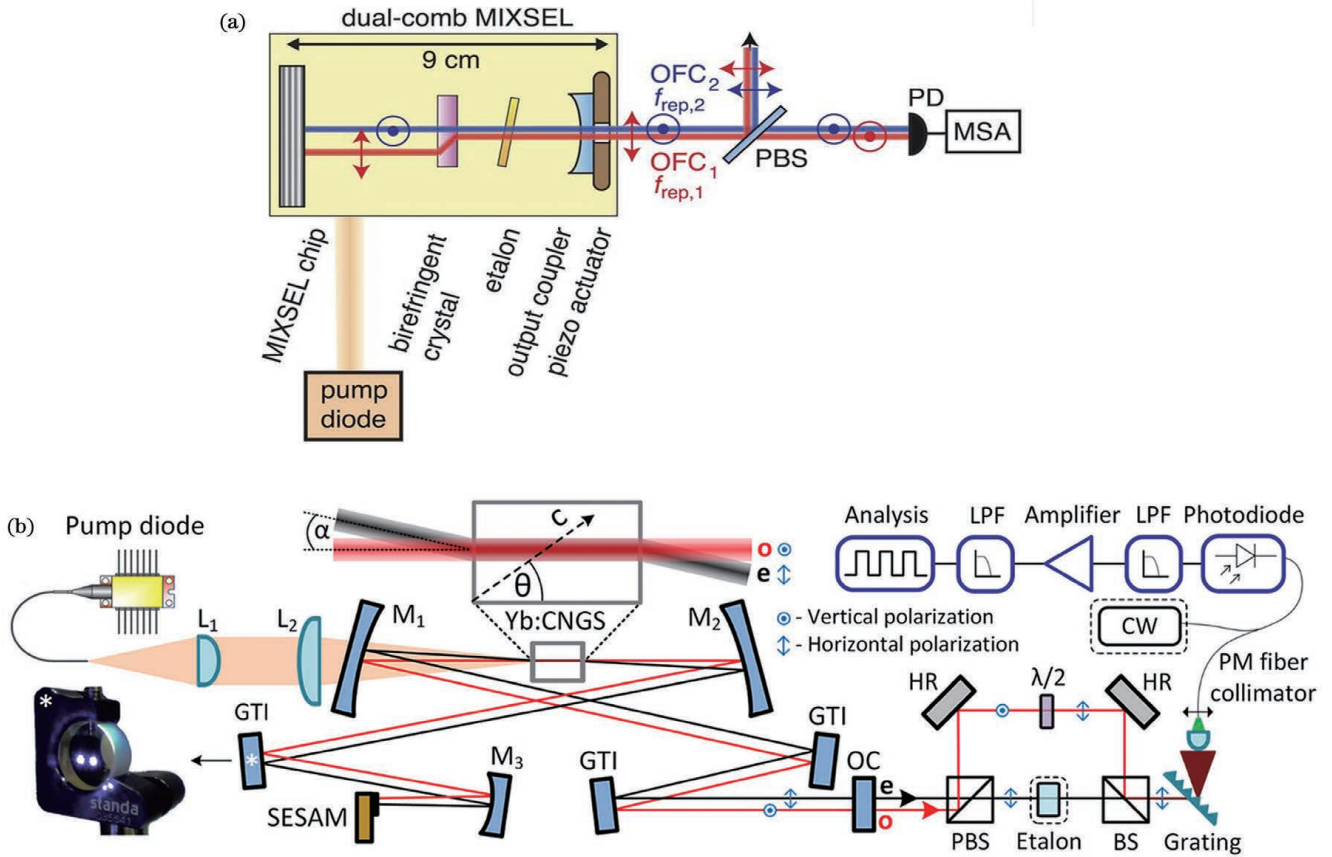


图 8 偏振复用的固体单腔双光梳。(a)偏振复用外腔表面发射锁模激光器<sup>[80]</sup>；(b)基于 Yb : CNGS 晶体的偏振复用固体激光<sup>[81]</sup>  
 Fig. 8 Solid-state polarization multiplexing SCDCs. (a) Polarization multiplexing external-cavity surface-emitting mode-locked laser<sup>[80]</sup> ; (b) polarization multiplexing solid-state laser based on Yb : CNGS crystal<sup>[81]</sup>

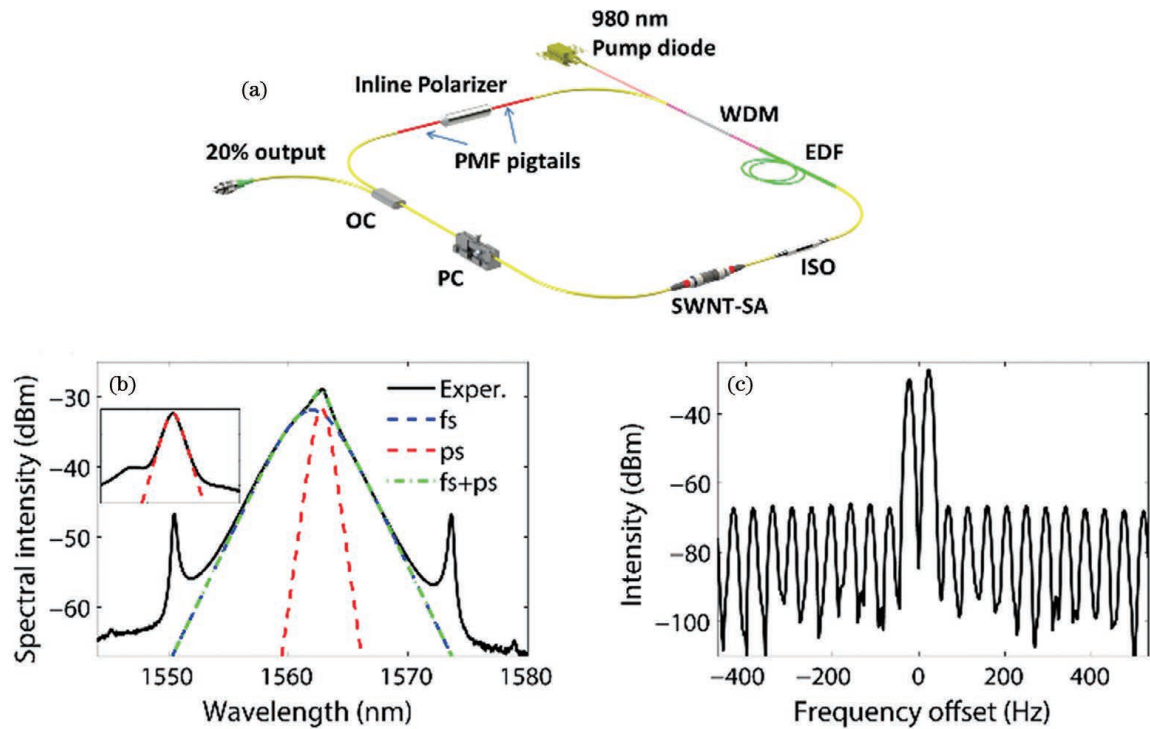


图 9 脉冲波形复用的单腔双光梳及其输出<sup>[11]</sup>。(a)原理图；(b)输出光谱；(c)输出频谱  
 Fig. 9 Pulse shape multiplexing SCDCs and its output<sup>[11]</sup>. (a) Schematic; (b) output optical spectra; (c) output frequency spectrum



表 1 基于不同复用技术的共腔 SCDC 光纤激光器的性能特点

Table 1 Performance characteristics of common-cavity SCDC fiber lasers with different multiplexing techniques

Parameter	Wavelength multiplexing	Direction multiplexing	Polarization multiplexing	Pulse shape multiplexing
Pulse width /fs	$\sim 10^2$	$\sim 10^2$	$\sim 10^2$	$\sim 10^2-10^3$
$\Delta f$ /Hz	$\sim 10^3$	$\sim 10-10^2$	$\sim 10^2$	$\sim 10$
Spectral overlap	Need spread spectrum	Yes	Yes	Yes
Self starting	Easy	Possible	Easy	Easy
Polarization maintaining	Possible	Possible	Possible	Impossible
Tunability of repetition frequency	Small	Small	Large	Small

### 3 单腔双光梳的应用

单腔双光梳光源的出现为实现低复杂度双光梳技术并拓展双光梳技术的应用范围开辟了一条新的道路。常见的双光梳测量技术大致可以分为时域和频域测量两类。根据测量模式的不同,这些技术对双梳间的相干

性与频率稳定性等又有着不同的要求。由于单腔双光梳光源在功率、谱宽、频差、相干性以及稳定度等方面与传统双光梳光源显著不同,因此探索和验证单腔双光梳光源在双梳应用方面的可行性一直是该方向的研究重点。目前已逐渐形成了图 10 所示的光谱学测量、太赫兹与电磁频谱测量、绝对距离测量及泵浦探测等应用方向。

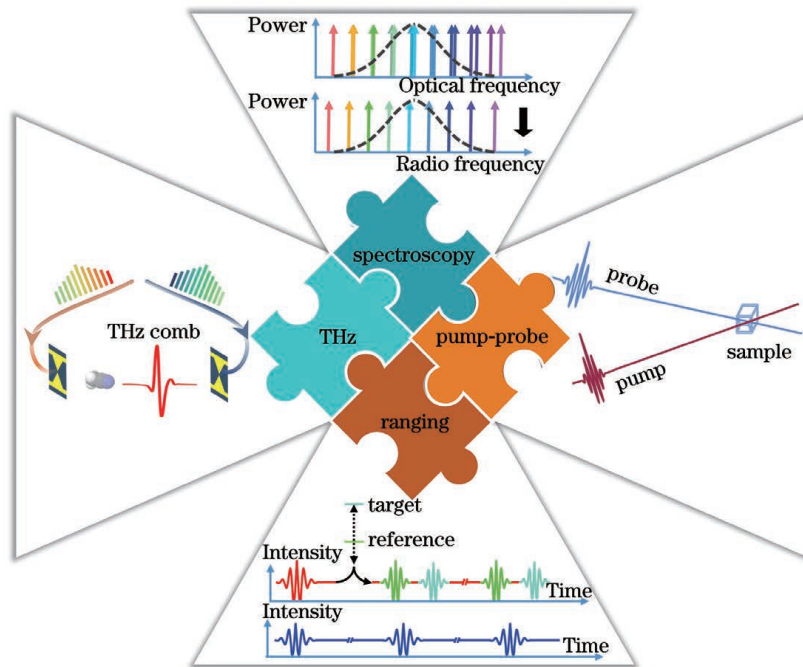


图 10 单腔双光梳的应用领域

Fig. 10 Application fields of SCDCs

#### 3.1 光谱学测量

传统的气体吸收测量多采用气相色谱法,然而此方法需要对气体样品进行预处理,无法进行实时检测。基于双光梳的光谱学测量技术是一种实现快速、高精度吸收谱测量的解决方案。单腔双光梳光源的出现使得双光梳光谱学测量应用的小型化、实用化成为可能。但光谱学测量对双梳间的互相干性、频差稳定性的要求高,在单腔双光梳光源的概念被提出之后,在无稳频条件下实现高质量的双梳光谱学测量成为亟须解决的关键问题,也是衡量单腔双光梳光源质量的重要标准。

2016 年本课题组基于自由运行的双波长单腔双光梳光纤激光器,在实验上证实了高精度光谱学测量的可行性<sup>[25]</sup>,演示方案如图 11(a)所示。双光梳的互线宽测量能够直接反映双光梳之间的相干性,同时,双光梳光谱测量的分辨率也可以反映双光梳光源的质量。课题组对乙炔标准气体以及多模式、高 Q 值的微环结构进行了光谱学测量。采用波分复用双光梳光源结合非线性放大与光谱扩展,利用双光梳之间的 250 Hz 互线宽远低于 1250 Hz 左右的重复频率差的特点,实现了对宽度为 150 MHz(约 3 倍梳齿间隔)的特征光谱峰形的高分辨率双光梳光谱学测量,有力

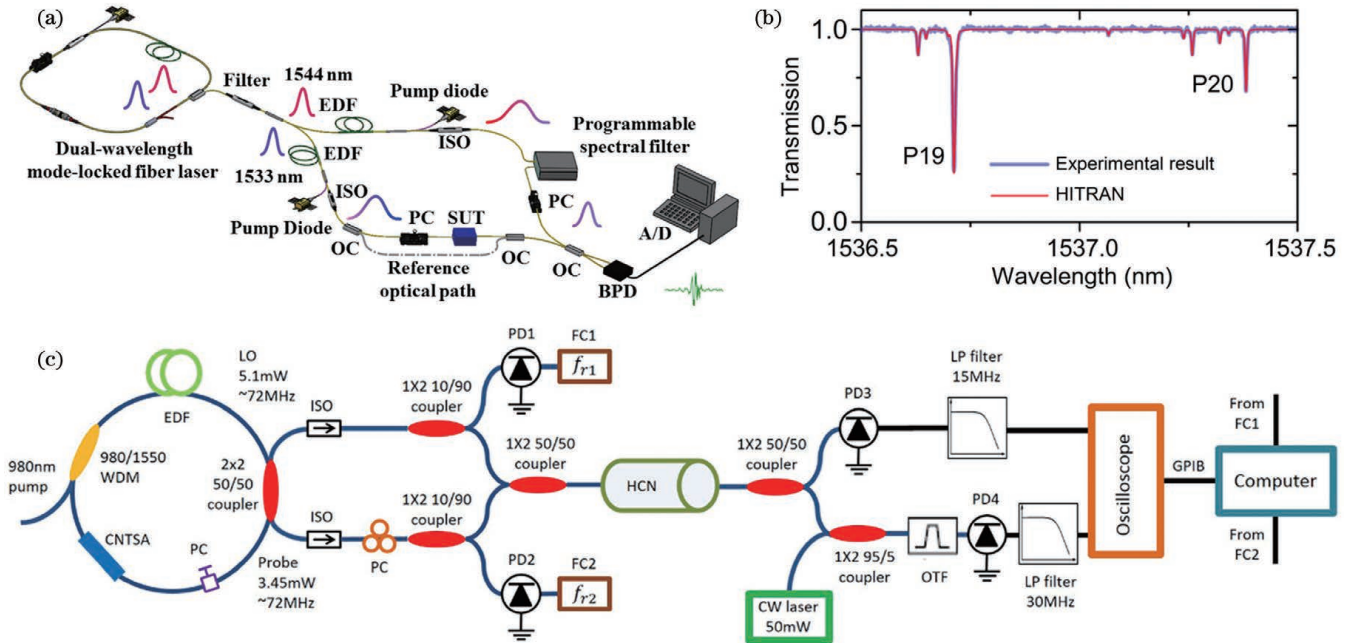


图 11  $1.5 \mu\text{m}$  单腔双光梳的光谱学测量。(a) 基于波长复用单腔双光梳光源的光谱测量方案<sup>[25]</sup>；(b) 乙炔气体的吸收谱测量结果<sup>[25]</sup>；(c) 基于方向复用单腔双光梳光源的光谱测量方案<sup>[54]</sup>

Fig. 11 SCDC spectroscopy measurement at  $1.5 \mu\text{m}$ . (a) Spectroscopy measurement scheme based on wavelength multiplexing SCDC laser<sup>[25]</sup>; (b) absorption spectrum measurement results of  $\text{C}_2\text{H}_2$ <sup>[25]</sup>; (c) spectroscopy measurement scheme based on direction-multiplexing SCDC laser<sup>[54]</sup>

地证明了单腔光源生成的双光频梳间的高互干性与低共模噪声特性。同年美国亚利桑那大学 Mehravar 等<sup>[54]</sup>采用方向复用单腔双光梳光源,实现了氰化氢气体的光谱学测量,方案如图 11(c)所示,双光梳重复频率差为 82 Hz,而互线宽约为 1.6 kHz,测量得到气体吸收峰的中心波长与标准数据的偏差标准差约为 207 MHz,如图 11(b)所示。2019 年波兰弗罗茨瓦夫理工大学 Sterczewski 等<sup>[76]</sup>基于偏振复用单腔双光梳激光器,对低压下多普勒受限的氰化氢吸收谱进行了测量,利用偏振复用双光梳光谱重叠的优势,获得了超过 1.7 THz 的光谱测量范围,采用相位校正算法进一步校正了失真的数据。

除了上述  $1.5 \mu\text{m}$  波段单腔双光梳光源的工作之外,由于大量的分子指纹分布于其他波段,因此,更长波长单腔双光梳技术也得到了关注。2018 年,天津大学 Liao 等<sup>[30]</sup>采用双波长掺铥锁模光纤激光器,测量了腔内光学路径的水分子吸收谱(1940 nm),系统如图 12(a)所示,获得了 43.4 pm 的光谱分辨率,如图 12(b)所示。2019 年,本课题组以波长复用的单腔双光梳掺铥激光器为种子光源,利用孤子自频移非线性光谱拓展技术,在  $1.6 \mu\text{m}$  波段实现了对重要温室气体——甲烷的光谱学测量,填补了目前掺铥与掺铥增益光纤工作波段之间的空白区域<sup>[84]</sup>,如图 12(c)所示。该工作一方面为单腔双光梳技术拓展至其他长波长光谱区域提供了有效途径,另一方面也验证了波长复用的双光梳在经过较大范围非线性光谱转移后,仍能够保持很好的互干性。基于该方案的双光梳光谱曲

线在不同平均次数下的结果如图 12(d)所示。美国亚利桑那大学 Olson 等<sup>[55]</sup>基于方向复用的单腔双光梳光源,对  $2 \mu\text{m}$  波段的水蒸气吸收谱进行了测量,瑞士苏黎世联邦理工学院 Link 等<sup>[80]</sup>基于外腔锁模面发射激光器输出的双偏振脉冲对  $1 \mu\text{m}$  波段水蒸气吸收谱进行了测量,瑞士纳沙泰尔大学 Modsching 等<sup>[85]</sup>基于偏振复用的碟片激光器对  $1 \mu\text{m}$  波段乙炔吸收谱进行了测量。

另一方面,除了在传统的气体光谱测量中所展示出来的高精度、宽光谱等优势外,单腔双光梳光谱技术在系统复杂度方面与传统双光梳技术存在巨大差异,这使其能够被应用到低成本或现场测量的新光谱测量应用领域中。例如, Xu 等<sup>[88]</sup>采用单腔双光梳光源与检测系统,演示了层流燃烧装置中水蒸气和乙炔等多组分气体浓度的现场检测。此外,已被长期研究且具有大量成熟技术的光纤传感领域是一个对成本和复杂度要求非常苛刻的应用领域。其中,典型的光纤布拉格光栅(FBG)作为一种基于光谱调制效应的高灵敏度传感器,具有重量轻、体积小、柔性好、易集成、可分布式传感等优点,被广泛用于测量应力、振动等物理量以及其他化学量。2013 年,日本东京大学 Kuse 等<sup>[89]</sup>采用双光梳方法对单个 FBG 进行了应力传感研究,展示了光频梳优越的由窄线宽、宽光谱的特性带来的超高光谱分辨率测量能力,但实验中的双光梳光源系统过于复杂且昂贵,缺乏性价比方面的实际优势。2018 年,本课题组使用单腔双光梳光源,搭建了对单个 FBG 动态特性进行解调的系统,如图 13(a)所

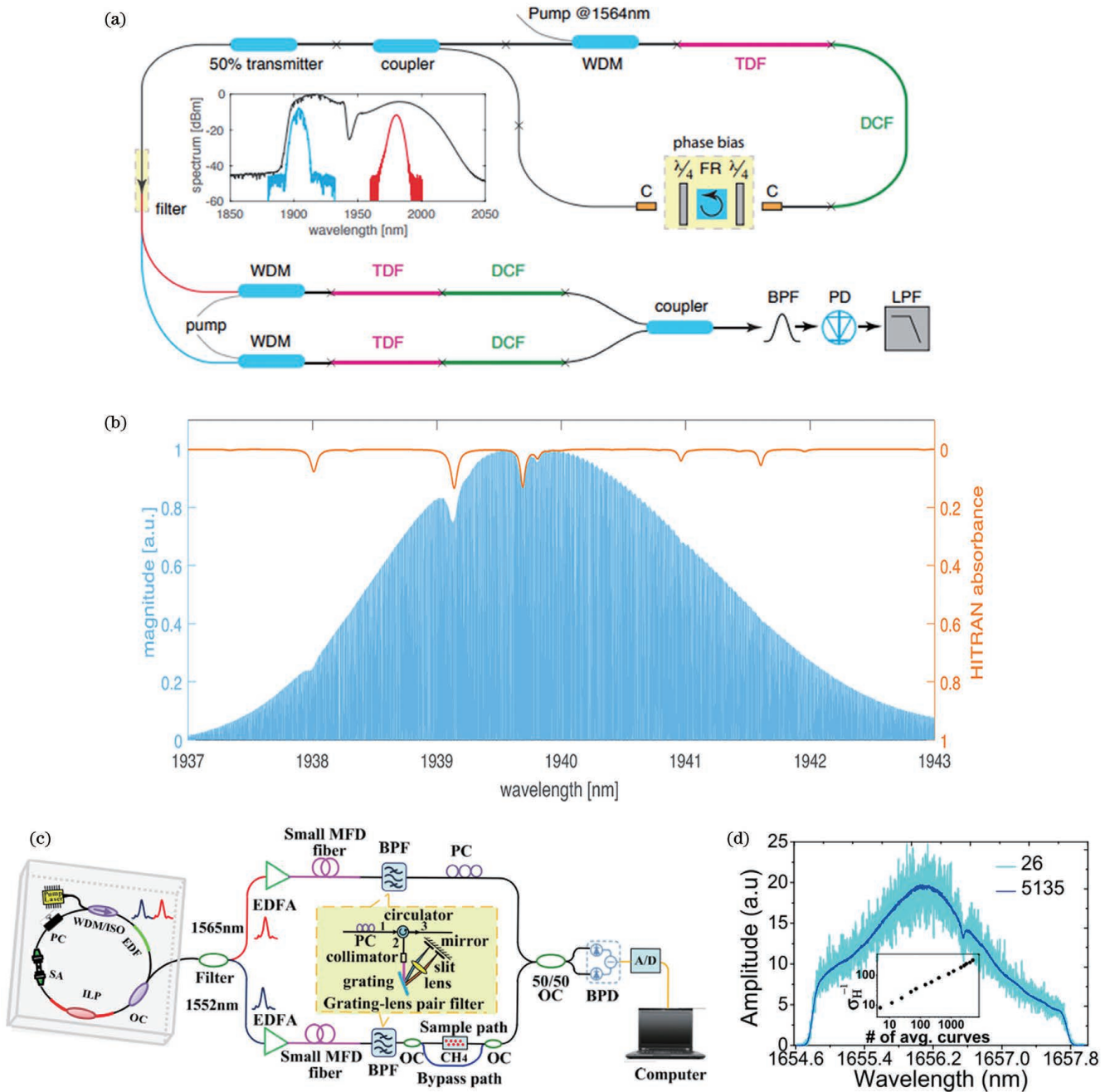


图 12 单腔双光梳光谱学测量区域的拓展。(a) 1.9  $\mu\text{m}$  波段单腔双光梳光谱学测量<sup>[30]</sup>；(b) 测量结果与 HITRAN 数据库的对比<sup>[30]</sup>；(c) 基于孤子自频移光谱拓展技术的 1.6  $\mu\text{m}$  波段单腔双光梳光谱学测量<sup>[84]</sup>；(d) 不同平均次数下的傅里叶变换双梳光谱曲线<sup>[84]</sup>

Fig. 12 Extension of spectroscopy measurement region of SCDCs. (a) SCDC spectroscopy measurement at 1.9  $\mu\text{m}$ <sup>[30]</sup>；(b) comparison of measurement result and HITRAN database<sup>[30]</sup>；(c) SCDC spectroscopy measurement at 1.6  $\mu\text{m}$  based on soliton self-frequency-shift spectrum extension technique<sup>[84]</sup>；(d) Fourier transform dual-comb spectral curves under different average numbers<sup>[84]</sup>

示。系统的光谱覆盖范围可达 10 nm, 光谱分辨率可达 1.7 pm, 如图 13(b) 所示, 实现了对 110~440 Hz 振动的动态解调, 且系统复杂度与现有解调系统接近<sup>[86]</sup>。同年, 清华大学 Guo 等<sup>[90]</sup>使用双向锁模的单腔双光梳技术, 对单根光纤上的 5 个不同波长的波分复用光纤光栅阵列进行了静态测量, 应变分辨率可达 0.5  $\mu\epsilon$ , 动态范围可达 520  $\mu\epsilon$ 。2020 年, 本课题组进一步实现了基于双波长双梳光源对全同弱反 FBG 阵

列的动态测量, 如图 13(c) 所示。实验演示了对 15 个 FBG 阵列的动态光谱解调, 系统可实现 mm 级的空间分辨率、pm 级的光谱分辨率、kHz 级的光谱解调速率和对  $10^3$  个 FBG 的并行检测<sup>[87]</sup>, 如图 13(d) 所示, 综合性能优异。清华大学 Guo 等<sup>[91]</sup>使用偏振复用双光梳产生方案, 对间隔为 1 cm 的 4 个波分复用传感器单元进行了测量和解调, 演示了其柔性穿戴传感能力。

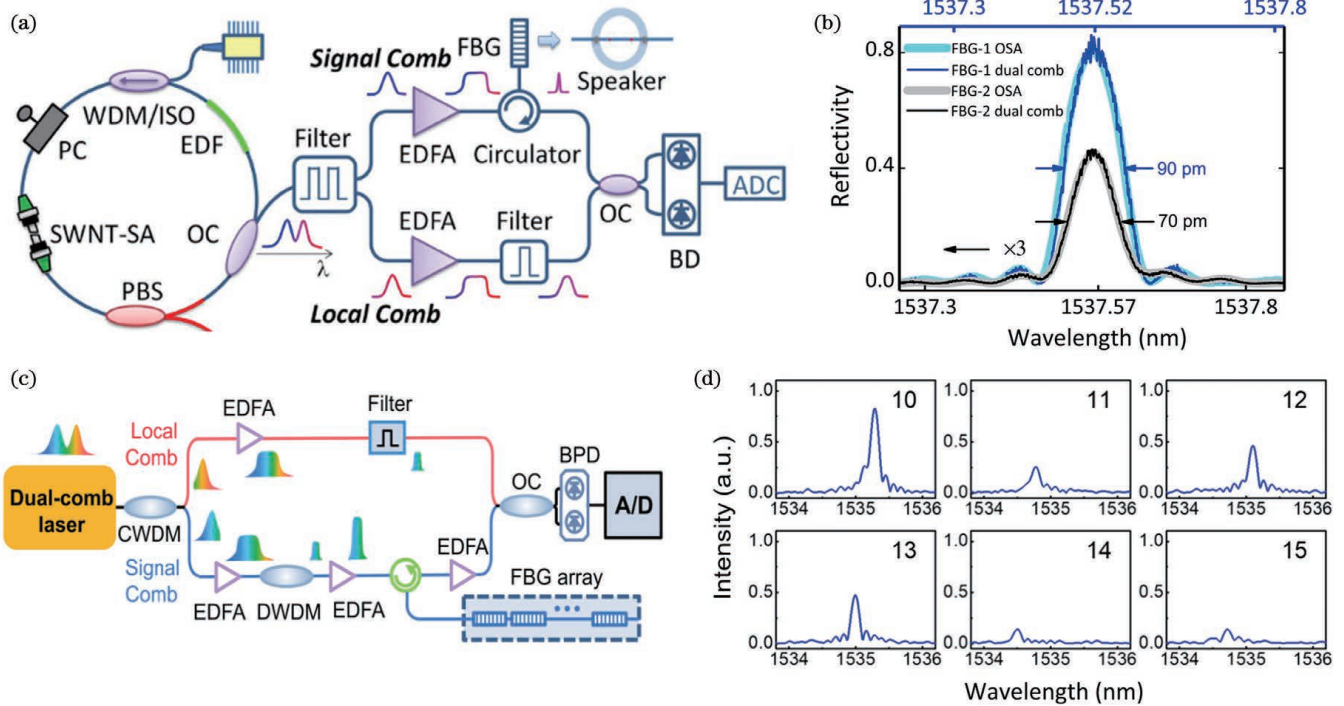


图 13 基于单腔双光梳的 FBG 光谱解调方案。(a) 基于单腔双光梳的单个 FBG 光谱学检测<sup>[86]</sup>；(b) 单腔双光梳单次解调光谱与光谱仪测量光谱的对比<sup>[86]</sup>；(c) 基于单腔双光梳的全同弱反 FBG 阵列的光谱学检测<sup>[87]</sup>；(d) 阵列光栅的单次光谱解调<sup>[87]</sup>  
 Fig. 13 FBG spectral demodulation scheme based on SCDCs. (a) Spectroscopy measurement of single FBG based on SCDCs<sup>[86]</sup>；  
 (b) comparison of single demodulation spectra of SCDCs with spectra measured by spectrometer<sup>[86]</sup>；(c) spectroscopy measurement of identical weak FBG array based on SCDCs<sup>[87]</sup>；(d) single spectral demodulation of array grating<sup>[87]</sup>

### 3.2 太赫兹与电磁频谱测量

与光频段的光谱测量技术不同,射频及太赫兹等频段的频谱测量需要对双光梳与相应频段的信号进行转换或采样。光梳的载波包络偏移频率并不会被转换到太赫兹或射频频段,因此,双光梳光源载波包络偏移频率的稳定性要求被降低。

太赫兹 (THz) 信号的频率是最基本的测量参量之一,尽管电外差法和光干涉法可被用来测量频率,但这两种测量技术存在测试装置热噪声大、需使用冷却装置或测量精度不高等问题。单腔双光梳光源的出现为实现连续波 THz 绝对频率的高精度实时测量提供了可能。

2017 年,本课题组 Hu 等<sup>[92]</sup>提出了基于单腔双光梳光源的 THz 频率测量方案,其装置如图 14(a) 所示。单腔双光梳光源经滤波放大后,每组脉冲分为两路,一路用来进行重复频率测量,一路则在光电导天线中与待测连续波 THz 信号发生混频,数据采集和处理系统同时采集两组重复频率信号和两组混频信号以进行实时处理和计算,实现绝对频率的实时测量。实验结果表明,在 100 Hz 的测量频率下,THz 信号的相对测量精度与相对测量准确度分别为  $1.2 \times 10^{-9}$  与  $1.4 \times 10^{-9}$ 。同年,本课题组基于微波光子学的信号转换机制,实现了双光梳微波信号的快速绝对频率测量<sup>[93]</sup>。2018 年又提出了一种基于单腔三光梳光源的无间隙微波频率测量方案<sup>[94]</sup>,实现了 1~20 GHz 范

围内的任意微波频率的精确测量,在 100 Hz 的刷新频率下达到了  $10^{-10}$  的测量精度。

2018 年,本课题组 Hu 等<sup>[95]</sup>采用波长复用光纤激光光源代替传统稳频双光梳光源进行 THz 时域光谱学测量,装置如图 14(b) 所示,实现了具有 1 GHz 光谱分辨率的氰化甲烷气体的光谱学测量。单腔双光梳和稳频双光梳系统的基本性能比较如图 14(c) 所示。同年,美国加利福尼亚大学洛杉矶分校 Baker 等<sup>[96]</sup>实现了基于方向复用单腔双光梳的 THz 光谱学测量。然而,由于光生太赫兹信号的功率低、信噪比差,测量速度远远超过类似的光频段测量系统,受激光器双梳间的残余相位抖动的限制,最终所得的 THz 双光梳光谱学测量系统的光谱分辨率都在 GHz 量级,仅与传统延时扫描的 THz 时域光谱系统相当。

为了解决这一问题,2020 年本课题组 Chen 等<sup>[97]</sup>进一步提出了基于单腔双光梳激光的自适应采样双 THz 梳光谱测量方法,如图 15(a) 所示,有效地拓展了时间采集窗口,延长了可平均累积时间,可以清晰分辨在低压氰化甲烷和氮气混合气体中处于振动激发态的氰化甲烷气体的吸收谱峰。在 115 Pa 的混合气体的压强下,测量的氰化甲烷气体的吸收线宽低至 25 MHz,已逼近该气体的多普勒极限吸收线宽,实验测量结果与标准数据之间的对比如图 15(b) 所示。该结果充分说明,基于单腔双光梳激光器的自适应采样 THz 光谱学测量方法可以突破现有太赫兹时域光谱

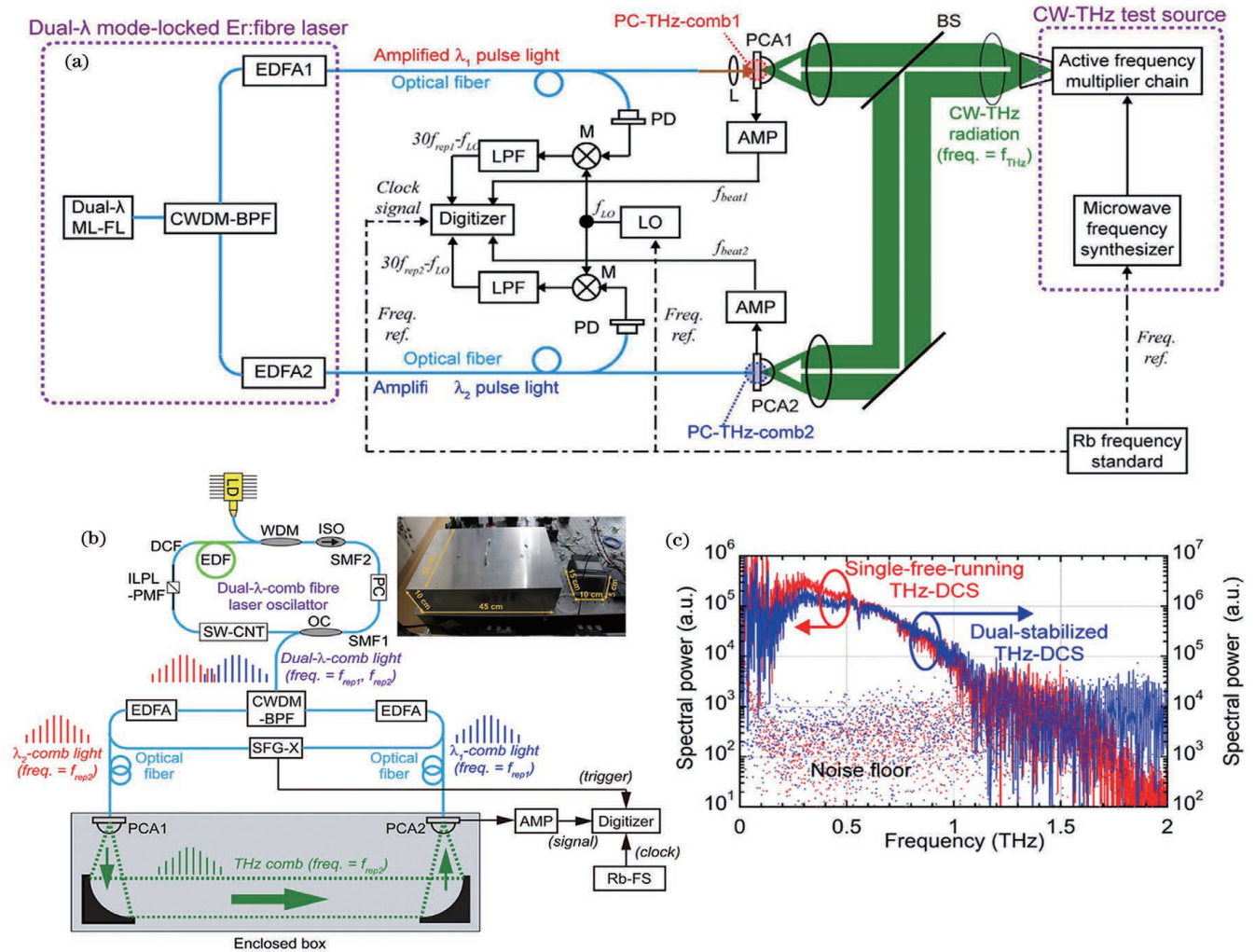


图 14 基于单腔双光梳的 THz 测量方案。(a) THz 频率测量<sup>[92]</sup>; (b) THz 频谱测量<sup>[95]</sup>; (c) 单腔双光梳和稳频双光梳系统的基本性能比较<sup>[95]</sup>

Fig. 14 THz measurement method based on SCDCs. (a) THz frequency measurement<sup>[92]</sup>; (b) THz spectrum measurement<sup>[95]</sup>; (c) comparison of basic performance between SCDC system and frequency-stabilized dual-comb system<sup>[95]</sup>

技术的光谱分辨率瓶颈, 实现具有超高光谱分辨率的太赫兹光谱学测量。

### 3.3 绝对距离测量

飞行时间法是光学测距的常规方法之一。通过测量待测目标反射脉冲与参考目标反射脉冲的时间间隔, 可以计算出待测目标的绝对距离。但是该技术受限于光电探测器的响应速度, 距离分辨率仅能达到毫米量级。采用双光梳进行距离测量能够将超短光脉冲等效拉伸为较宽的时域信号, 在提升测量精度的同时又极大地降低了系统对光电探测器高带宽的要求<sup>[98]</sup>。在保证双梳相干性的前提下, 单腔双光梳的使用降低了系统的复杂性, 提高了测距系统的实用性。

本课题组在 2012 年率先提出采用单腔双光梳光源进行相干双梳距离测量的方法, 实验上初步演示了基于波长复用双光梳的距离测量<sup>[99]</sup>。2013 年本课题组以波长复用双光梳作为光源, 利用半导体光放大器的超快非线性饱和特性, 实现了非相干接收的低功

率双梳距离测量<sup>[100-101]</sup>。2014 年本课题组以偏振复用的单腔双光梳作为光源, 不需要利用非线性效应拓展光谱, 即可实现相干双梳测距<sup>[73]</sup>。

2017 年中国计量科学研究院 Lin 等<sup>[102]</sup>对基于单腔双光梳的绝对距离测量方法的性能进行了更深入研究, 测量方案如图 16 所示。该研究利用波长复用单腔双光梳光纤激光器, 在 70 m 大距离范围内进行了测距精度的测量, 证明其在 1 s 的测量时间内的精度可达到  $\mu\text{m}$  量级。基于单腔双光梳的测距系统在保证测量精度的同时, 具有简单紧凑、成本低廉的优势, 国内外多个课题组开展了相关的研究工作。2019 年天津大学 Li 等<sup>[103]</sup>使用保偏波长复用单腔双光梳光源, 实现了 65 m 测距范围内的  $2 \mu\text{m}$  测距精度, 并通过卡尔曼滤波处理方法, 在保持测量精度的同时, 实现了 200 Hz 的更新频率, 后续还进行了对非合作目标的测量<sup>[104]</sup>。2021 年瑞士苏黎世联邦理工学院 Nürnberg 等<sup>[105]</sup>使用偏振复用固体激光器, 实现了低于  $1 \mu\text{m}$  的测距精度。

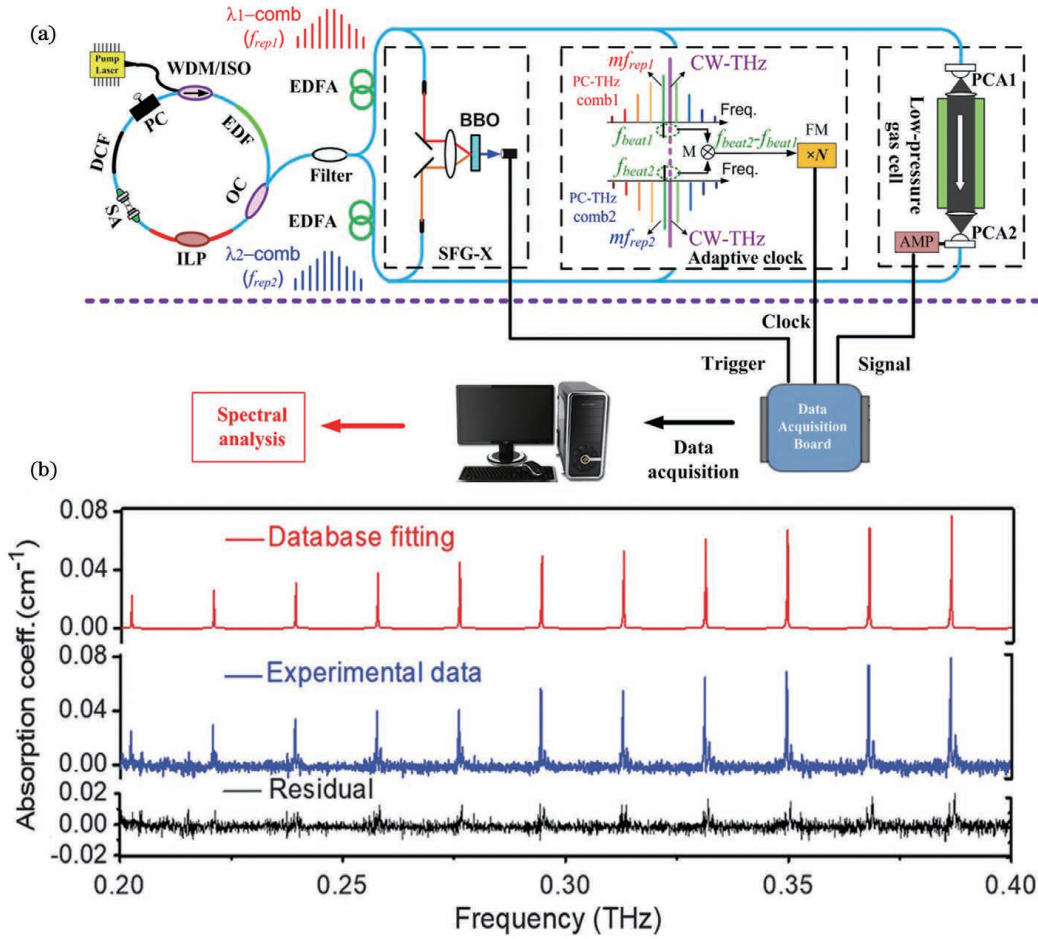


图 15 基于单腔双光梳的自适应太赫兹双梳光谱测量方案<sup>[97]</sup>。(a)实验装置图;(b)实验测量结果与标准数据之间的对比  
 Fig. 15 Adaptive terahertz dual-comb spectroscopy measurement scheme based on SCDC<sup>[97]</sup>. (a) Experimental setup;  
 (b) comparison between experimental measurement result and standard data

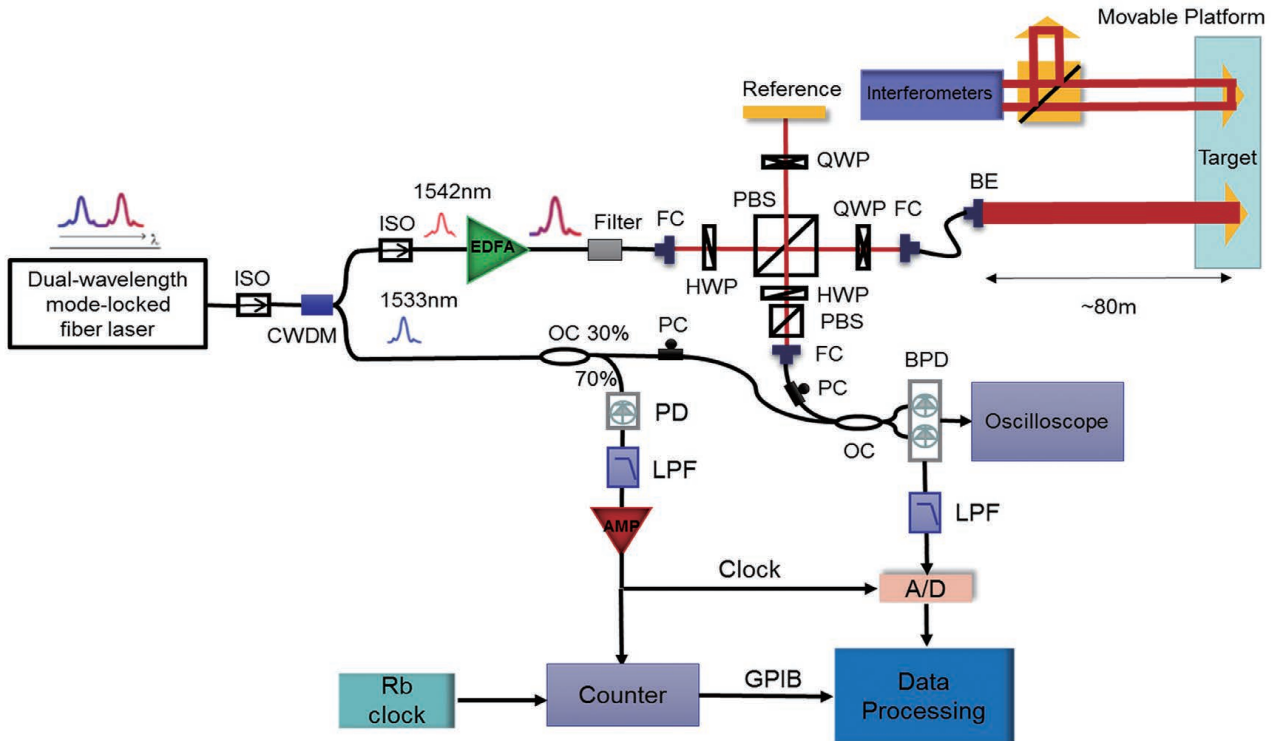


图 16 单腔双光梳测距方案<sup>[102]</sup>  
 Fig. 16 Ranging scheme based on SCDC<sup>[102]</sup>

### 3.4 泵浦探测

泵浦探测技术是研究众多物理现象的有力工具。通过改变强泵浦脉冲和较弱探测脉冲之间的延迟,测量探测脉冲的相应变化,可以获得泵浦引起的光学特性的瞬态变化过程。因此,泵浦脉冲和探测脉冲之间时间延迟的步长、范围、速度对泵浦探测技术的时间分辨率、时间范围和测量速度起着关键作用。传统的泵浦探测方案通常使用机械步进延迟线来实现泵浦脉冲和探测脉冲之间的延迟。单腔双光梳光源生成的异步双光梳脉冲之间的自动步进延迟可以代替机械延迟线,大幅度降低泵浦探测系统的复杂度。泵浦探测通常测量的是脉冲能量,因此与相干双梳测距相比,采用自由运转的单腔双光梳光源更方便。

2012 年本课题组最早提出利用单腔双光梳激光

器实现双色泵浦探测的方法<sup>[106]</sup>。搭建的测量装置如图 17 所示,系统采用双波长被动锁模光纤激光器作为泵浦探测的光源,实验中除了要注意避免过多光纤色散和脉冲畸变的影响外,不需要像传统泵浦探测光路一样严格控制泵浦光和探测光的延迟,这使得系统实现非常简单。此外,在泵浦探测实验中,所能探测的时间长度取决于泵浦光和脉冲光之间的最大延迟,相比于只能达到几十厘米的机械延迟线,单腔双光梳方案中脉冲间的最大延迟为激光器腔长,可达到米级。本课题组使用该方案对半导体光放大器(SOA)的载流子动力学过程进行了动态观测,扫描范围为几十纳秒,时域采样步长为亚皮秒,刷新率为几百 Hz。随着单腔双光梳光源性能的改善和频差设计的后续改进,等效时域采样步长目前可达到 10 fs 量级。

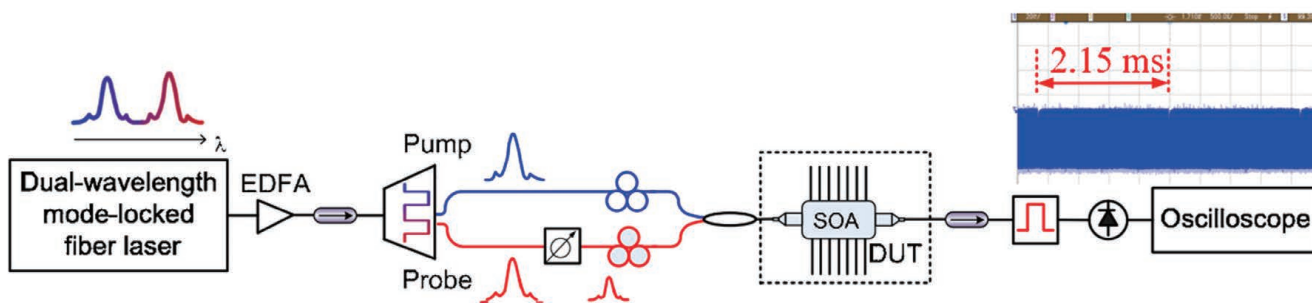


图 17 基于单腔双光梳的泵浦探测方案<sup>[106]</sup>

Fig. 17 Pump-probe scheme based on SCDC<sup>[106]</sup>

2018 年德国凯泽斯劳滕大学 Kolano 等<sup>[107]</sup>使用双向锁模激光器进行了泵浦探测实验。2021 年瑞士苏黎世联邦理工学院 Nussbaum-Lapping 等<sup>[108]</sup>使用偏振复用单腔双光梳固体光源,对 SESAM 动力学模型中的相关时间常数进行了泵浦探测,测量结果与经典模型一致。

基于双光梳的泵浦-探测测量更加适用于时间尺度跨度较大的超快过程,而时间尺度仅为几飞秒乃至亚飞秒的极端瞬态物理现象则受限于异步采样的时域采样步长。对泵浦-探测脉冲的时间同步实现精密控制仍是一个难点。

## 4 新方向:单腔双光梳激光动力学研究及单腔多光梳技术

单腔双光梳光源在上述应用中展示了由共腔带来的固有相干性,其低复杂度和低成本为其应用提供了更多的空间。但是,在锁模激光器这一高非线性系统中,在共腔、异步脉冲共存的情况下,双光梳脉冲在时域上必然存在着由重合到逐渐分开的周期性循环。这与原有的单脉冲锁模光源中不受扰动的周期性脉冲序列具有本质性的差异。针对多脉冲锁模光源,研究者对双向锁模等光源中的同步脉冲间的相互碰撞进行了研究<sup>[40,46]</sup>。双梳异步脉冲间的作用效应可能带来新的不同。双梳在腔内的相互作用产生的扰动及其可能

引起的脉冲特性演化既可能对单腔双光梳光源的性能产生影响,又能为多孤子复杂相互作用下的动力学问题提供了独特的实验研究平台。因此,近几年围绕波长、方向、偏振等不同复用方式的单腔双光梳光源内的脉冲相互作用的科学问题,国内外开展了大量研究。

2017 年,本课题组采用波长复用的单腔双光梳光源,通过腔内的色散管理控制,实验研究了在低腔内色散、强饱和吸收效应下,腔内双波长脉冲由时间异步向时间同步的演化过程,观察到了双波长脉冲在同步状态下在饱和吸收体中产生的可能的四波混频相互作用<sup>[109]</sup>,如图 18(a)所示。2018 年,香港大学 Wei 等<sup>[110]</sup>在搭建的波长复用单腔双光梳光源中,采用时间展宽色散傅里叶(DFT)方法,观测到了脉冲碰撞过程中的光谱变化及恢复的动力学过程,并解释了 Kelly 边带造成孤子间长程相互作用的原因,如图 18(b)所示。华南师范大学 Liu 等<sup>[111]</sup>在双波长掺镱光纤激光器中研究了孤子碰撞引起的孤子爆炸现象。对于双向激光器,2019 年华南师范大学与香港大学合作研究了其中的瞬态不稳定性对耗散孤子光谱和时间特性的影响<sup>[112]</sup>。随后,英国阿斯顿大学 Kudelin 等<sup>[113]</sup>研究了双向锁模掺铒光纤激光器中双向传播孤子的实时动力学过程。如图 18(c)所示。香港大学 Zhou 等<sup>[114]</sup>研究了双向锁模激光器中的呼吸孤子的分子切换。在偏振复用光源方面,清华大学 Zhao 等<sup>[115-116]</sup>采用偏振复用

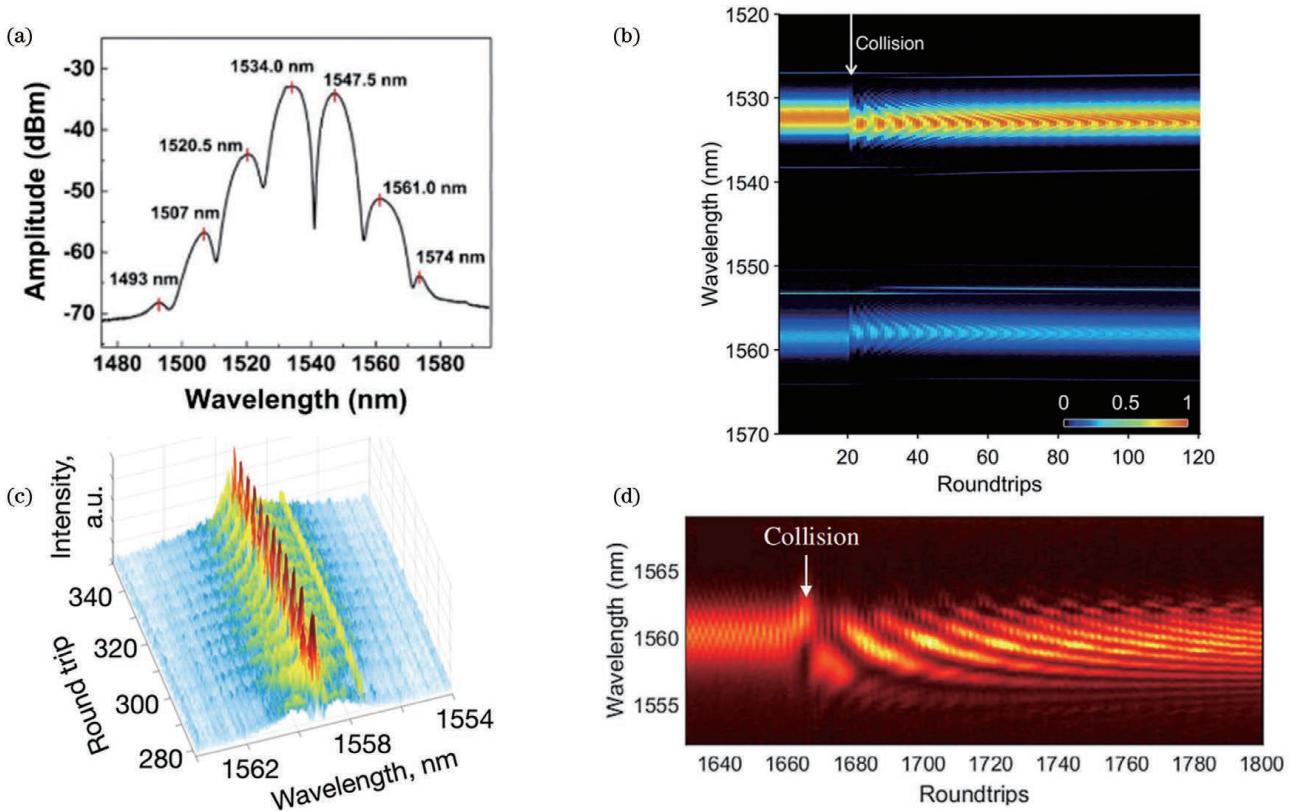


图 18 超快激光器动力学研究。(a) 波长复用 SCDC 激光腔内脉冲从异步到同步的演化<sup>[109]</sup>; (b) 波长复用 SCDC 的腔内孤子碰撞动力学<sup>[110]</sup>; (c) 方向复用 SCDC 的孤子形成动力学<sup>[113]</sup>; (d) 偏振复用 SCDC 的孤子碰撞动力学<sup>[115]</sup>

Fig. 18 Study on ultrafast laser dynamics. (a) Evolution from asynchronous to synchronous of intracavity pulses in wavelength division multiplexing SCDC<sup>[109]</sup>; (b) dynamics of intracavity soliton collision in wavelength division multiplexing SCDC<sup>[110]</sup>; (c) dynamics of soliton formation in direction-multiplexing SCDC<sup>[113]</sup>; (d) dynamics of soliton collision in polarization-multiplexing SCDC<sup>[115]</sup>

单腔双光梳光源,研究了正交偏振的矢量孤子的动力学特性,如图 18(d)所示。

另一方面,在双光梳激光的基础上,如果能再引入一个及以上的光梳,形成由多个具有不同重复频率的光梳组成的三梳或多梳系统,则可以进一步地拓展测量的物理维度和尺度。例如,美国密西根大学 Lomsadze 等<sup>[117]</sup>采用稳频三光梳光源,进行了非线性光谱测量,在双光梳光谱测量的基础上,通过引入额外

维度的自动异步延迟,获得了延迟时间相关的二维非线性光谱测量<sup>[118]</sup>。然而,对于许多潜在的应用,基于三个稳频光频梳的三光梳系统比双光梳系统更加复杂和昂贵。因此,单腔多光梳技术成为了一种更有吸引力的替代解决方案。2018 年,本课题组率先采用波长复用的方式,实现了单腔三光梳光源<sup>[94]</sup>,如图 19(a)所示,并演示了其在无死区电磁频率测量方面的应用。相比于双光梳光源,三光梳光源拓展了频率测量范围,

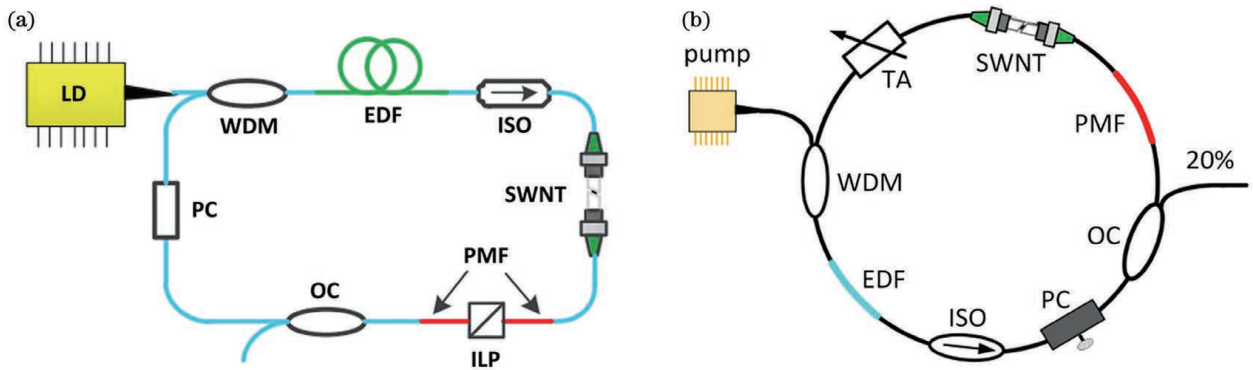


图 19 单腔多光梳光源方案。(a) 波分复用单腔三光梳激光<sup>[94]</sup>; (b) 基于波长-偏振的多维度复用锁模激光<sup>[119]</sup>

Fig. 19 Single-cavity multi-comb light source scheme. (a) Single-cavity triple-comb laser based on wavelength division multiplexing<sup>[94]</sup>; (b) multi-dimensional multiplexing mode-locked laser based on wavelength-polarization<sup>[119]</sup>



解决了测量死区问题。但从复用维度的角度来看,在波长以外的其他物理维度上很难实现三梳或多梳的生成,而且波长维度也受限于有限的增益谱宽,因此多光梳信号的性能受到很大限制。针对此问题,2019 年本课题组利用多维度复用锁模激光,通过光腔内的多个维度组合,给出了实现单腔三光梳乃至多光梳光源的方案<sup>[119]</sup>,如图 19(b)所示。实验中通过波长与偏振两个维度的复用实现了多光频梳的生成,并对该多光梳光源中的任意两个光梳之间的相干拍频信号进行了测量,测量结果表明,各光梳之间均存在良好的互相干性。2020 年,哈尔滨工业大学 Yang 等<sup>[120]</sup>设计了双环部分共腔的多维度复用锁模激光结构,实现了方向与波长复用结合的三光梳生成。

在单腔多光梳的应用方面,2019 年,本课题组提出了一种基于波长复用单腔三光梳光源的实时大模糊范围距离测量方案,通过一个光梳对其他两个光梳的异步采样,将测距的模糊范围从腔长尺度拓展到几十千米量级<sup>[121]</sup>。2022 年,本课题组提出了一种面向快速高动态光谱测量的基于单腔三光梳光源的

双异步采样方案<sup>[122]</sup>,如图 20(a)所示。传统双光梳光谱测量以准静态对象为主,对于双光梳光谱测量系统而言,光谱测量的刷新率受限于重复频率差的一半,这与光谱测量混叠带宽不一致。对于超出刷新率的快速变化光谱信号,无法正确获得其变化频率。如果有重复频率不同的第三个光梳且三梳间的重复频率差有所不同,则可以使用两组双光梳分别对快速变化的信号光谱同时进行采样,通过两组动态双光梳光谱之间的差别,进一步提取动态双光梳光谱的频域特征,进而利用频域特征的差异,恢复原动态光谱的变化频率信息,消除原双光梳方法的相关限制。实验装置如图 20(b)所示,使用高频振动的 FBG 反射光信号作为待测动态光谱信号,在不影响混叠带宽和双光梳光谱测量精度的情况下,准确解调了高达 110 kHz 的光谱调制频率,与原有双光梳方案相比提高了两个数量级以上,如图 20(c)所示。上述多光梳方法拓展了双光梳测量维度和尺度,而单腔多光梳技术有利于多光梳方法在现场检测场景中的应用。

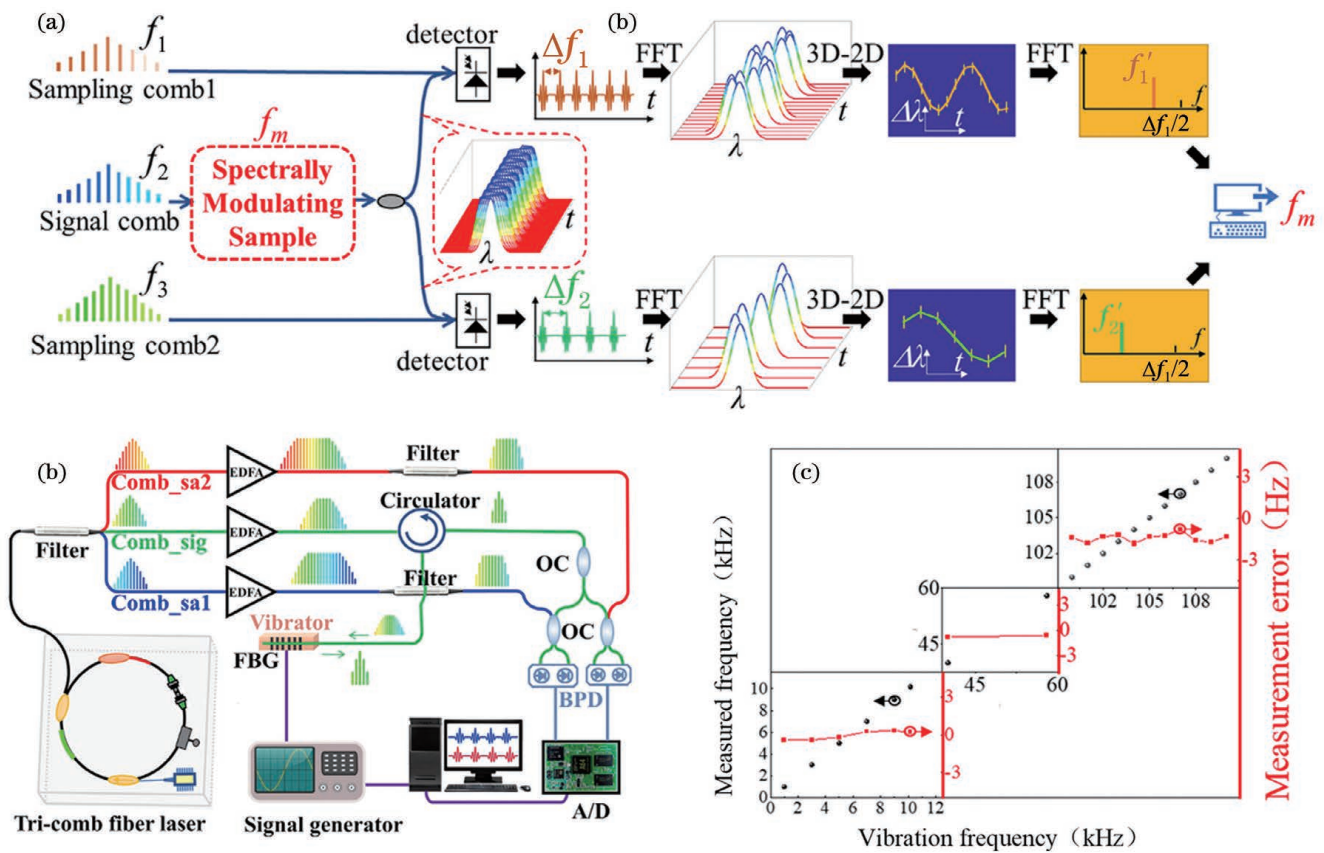


图 20 基于单腔三光梳光源的双异步采样方案。(a)基于三光梳双异步采样的动态光谱解调原理图<sup>[122]</sup>; (b)基于单腔三光梳光源的双异步采样实验装置图; (c)光谱调制频率的解调结果

Fig. 20 Dual-asynchronous sampling scheme based on single-cavity triple-comb laser. (a) Schematic of dynamic spectral demodulation based on triple-comb dual-asynchronous sampling<sup>[122]</sup>; (b) experimental setup of dual-asynchronous sampling based on single-cavity triple-comb laser; (c) demodulation results of spectral modulation frequency

## 5 总结与展望

作为一个仍在蓬勃发展的前沿方向,单腔双光梳

技术在过去十年的快速发展过程中,既展现了广阔的发展前景,又面临着诸多深层次的挑战。一方面,单腔双光梳系统具有结构简单、功耗低、成本低、体积小等

优势,但也面临由特有的复用光腔结构和腔内双梳动力学过程带来的新机理与新技术挑战。重复频率差的可调节性与稳定性及脉冲能量与相互作用等之间的相互约束有待进一步研究。

稳频双光梳系统在对测量绝对精度要求高的应用中仍是最佳乃至唯一的选择,同时其系统复杂度与成本随着集成等技术的发展而快速降低。相比之下,在对系统成本、体积、功耗等更为敏感而不追求过高的绝对测量精度的应用场景中,单腔双光梳系统更能发挥自身优势。同时,与普适性高且关键参数电控可调的稳频双光梳系统相比,不同类型、不同设计的单腔双光梳光源特性有显著差异,还需不断探索匹配度高、独特性高的优势应用项目。两种双光梳技术在本质上并不能完全互相替代,但能以高低搭配、优势互补的形式共同推动光频梳技术的发展与应用。

从单腔双光梳复用光源的提出到单腔双光梳测量应用的探索,我国科研团队都发挥了不可替代的关键作用,我们期待并相信中国学者在今后的单腔双光梳技术研究中作出更大的贡献。

### 参 考 文 献

- [1] Hänsch T W. Nobel lecture: passion for precision[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1297-1309.
- [2] Schiller S. Spectrometry with frequency combs [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(9): 766-768.
- [3] Coddington I, Swann W C, Newbury N R. Coherent multiheterodyne spectroscopy using stabilized optical frequency combs[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(1): 013902.
- [4] Yasui T, Hayashi K, Ichikawa R, et al. Real-time absolute frequency measurement of continuous-wave terahertz radiation based on dual terahertz combs of photocarriers with different frequency spacings[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11367-11377.
- [5] 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.
- [6] Bartels A, Hudert F, Janke C, et al. Femtosecond time-resolved optical pump-probe spectroscopy at kilohertz-scan rates over nanosecond-time-delays without mechanical delay line[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(4): 041117.
- [7] 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.
- [8] Zhao X, Zheng Z, Liu L, et al. Switchable, dual-wavelength passively mode-locked ultrafast fiber laser based on a single-wall carbon nanotube modelocker and intracavity loss tuning [J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1168-1173.
- [9] Zhao X, Zheng Z, Liu Y, et al. Dual-wavelength, bidirectional single-wall carbon nanotube mode-locked fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(17): 1722-1725.
- [10] Zhao X, Li T, Liu Y, et al. Polarization-multiplexed, dual-comb all-fiber mode-locked laser [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(9): 853-857.
- [11] Liu Y, Zhao X, Hu G Q, et al. Unidirectional, dual-comb lasing under multiple pulse formation mechanisms in a passively mode-locked fiber ring laser [J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 21392-21398.
- [12] Matsas V J, Newson T P, Richardson D J, et al. Selfstarting passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarisation rotation[J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(15): 1391-1393.
- [13] Noske D U, Guy M J, Rottwitt K, et al. Dual-wavelength operation of a passively mode-locked "figure-of-eight" ytterbium-erbium fibre soliton laser [J]. *Optics Communications*, 1994, 108(4/5/6): 297-301.
- [14] Margalit M, Orenstein M, Eisenstein G. Synchronized two-color operation of a passively mode-locked erbium-doped fiber laser by dual-injection locking [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(19): 1585-1587.
- [15] Zhao Y, Shu C. A fiber laser for effective generation of tunable single- and dual-wavelength mode-locked optical pulses [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72(13): 1556-1558.
- [16] Bakhshi B, Andrekson P A. Dual-wavelength 10-GHz actively mode-locked erbium fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(11): 1387-1389.
- [17] Town G E, Chen L, Smith P W E. Dual wavelength modelocked fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(11): 1459-1461.
- [18] Yao J, Yao J P, Wang Y, et al. Active mode locking of tunable multi-wavelength fiber ring laser [J]. *Optics Communications*, 2001, 191(3/4/5/6): 341-345.
- [19] Pan S L, Lou C Y. Multiwavelength pulse generation using an actively mode-locked erbium-doped fiber ring laser based on distributed dispersion cavity [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(4): 604-606.
- [20] Gong Y D, Tian X L, Tang M, et al. Generation of dual wavelength ultrashort pulse outputs from a passive mode locked fiber ring laser [J]. *Optics Communications*, 2006, 265(2): 628-631.
- [21] Xie G Q, Tang D Y, Luo H, et al. Dual-wavelength synchronously mode-locked Nd : CNGG laser [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(16): 1872-1874.
- [22] Chen W C, Luo Z C, Xu W C. The interaction of dual wavelength solitons in fiber laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2009, 6(11): 816-820.
- [23] Luo Z C, Luo A P, Xu W C. Tunable and switchable multiwavelength passively mode-locked fiber laser based on SESAM and inline birefringence comb filter [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, 3(1): 64-70.
- [24] Zhang H, Tang D Y, Wu X, et al. Multi-wavelength dissipative soliton operation of an erbium-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2009, 17(15): 12692-12697.
- [25] Zhao X, Hu G Q, Zhao B F, et al. Picometer-resolution dual-comb spectroscopy with a free-running fiber laser [J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 21833-21845.
- [26] Chen J, Wang R L, Li T, et al. Self-starting, turn-key dual-comb mode-locked fiber laser with a few-mode fiber filter [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, May 14-19, 2017, San Jose, California. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2017: JW2A.5.
- [27] Wang R L, Zhao X, Bai W N, et al. Polarization-maintaining, dual-wavelength, dual-comb mode-locked fiber laser [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, May 13-18, 2018, San Jose, California. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2018: JTh2A.139.
- [28] Shi H S, Song Y J, Li R M, et al. Review of low timing jitter mode-locked fiber lasers and applications in dual-comb absolute distance measurement [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2018, 1(4): 205-217.
- [29] Li R M, Shi H S, Tian H C, et al. All-polarization-maintaining dual-wavelength mode-locked fiber laser based on Sagnac loop filter [J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 28302-28311.
- [30] Liao R Y, Song Y J, Liu W, et al. Dual-comb spectroscopy with a single free-running thulium-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 11046-11054.
- [31] Fellinger J, Winkler G, Mayer A S, et al. Tunable dual-color operation of Yb : fiber laser via mechanical spectral subdivision

- [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 5478-5486.
- [32] Pawliszewska M, Dużyńska A, Zdrojek M, et al. Wavelength- and dispersion-tunable ultrafast holmium-doped fiber laser with dual-color operation[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(4): 956-959.
- [33] Guo Z R, Liu T T, Peng J S, et al. Self-started dual-wavelength mode-locking with well-controlled repetition rate difference[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(11): 3575-3581.
- [34] Luo X, Tuan T H, Saini T S, et al. Tunable and switchable all-fiber dual-wavelength mode locked laser based on Lyot filtering effect[J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 14635-14647.
- [35] Fellinger J, Mayer A S, Winkler G, et al. Tunable dual-comb from an all-polarization-maintaining single-cavity dual-color Yb : fiber laser[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 28062-28074.
- [36] Zhu Y J, Sun X N, Cui Z K, et al. A novel fiber-based dynamically tunable Lyot filter for dual-wavelength and tunable single-wavelength mode-locking of fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 27250-27257.
- [37] Lin J Q, Dong Z P, Dong T H, et al. Wavelength switchable all-fiber mode-locked laser based on nonlinear multimode interference[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 141: 107093.
- [38] Buholz N, Chodorow M. 3. 2-Acoustic wave amplitude modulation of a multimode ring laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1967, 3(11): 454-459.
- [39] Bohn M J, Diels J C. Bidirectional Kerr-lens mode-locked femtosecond ring laser[J]. *Optics Communications*, 1997, 141(1/2): 53-58.
- [40] Bohn M J, Jason Jones R, Diels J C. Mutual Kerr-lens mode-locking[J]. *Optics Communications*, 1999, 170(1/2/3): 85-92.
- [41] Guandalini A, Diels J C, Reali G, et al. Bidirectional operation of a diode pumped vanadate laser[C]//*Advanced Solid-State Lasers*, January 28, 2001, Seattle, Washington. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2001: TuB17.
- [42] Meng X M, Diels J C, Kuehlke D, et al. Bidirectional, synchronously pumped, ring optical parametric oscillator[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(5): 265-267.
- [43] Kubecek V, Diels J C, Stintz A. Bidirectional operation of a ring diode-pumped mode-locked Nd : YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5460: 309-314.
- [44] Liu Y, Sun L, Qiu H, et al. Bidirectional operation and gyroscopic properties of passively mode-locked Nd : YVO<sub>4</sub> ring laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 4(3): 187-190.
- [45] Kieu K, Mansuripur M. All-fiber bidirectional passively mode-locked ring laser[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(1): 64-66.
- [46] Braga A, Diels J C, Jain R, et al. Bidirectional mode-locked fiber ring laser using self-regenerative, passively controlled, threshold gating[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(15): 2648-2650.
- [47] Ouyang C M, Shum P, Wu K, et al. Bidirectional passively mode-locked soliton fiber laser with a four-port circulator[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(11): 2089-2091.
- [48] Cui Y D, Liu X M. Graphene and nanotube mode-locked fiber laser emitting dissipative and conventional solitons[J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 18969-18974.
- [49] Zeng C, Liu X M, Yun L. Bidirectional fiber soliton laser mode-locked by single-wall carbon nanotubes[J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 18937-18942.
- [50] Yun L, Liu X M, Han D D. Observation of vector- and scalar-pulse in a nanotube-mode-locked fiber laser[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5442-5447.
- [51] Liu H H, Chow K K. Operation-switchable bidirectional pulsed fiber laser incorporating carbon-nanotube-based saturable absorber[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 278-282.
- [52] Mamidala V, Woodward R I, Yang Y, et al. Graphene-based passively mode-locked bidirectional fiber ring laser[J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 4539-4546.
- [53] Ideguchi T, Nakamura T, Kobayashi Y, et al. Kerr-lens mode-locked bidirectional dual-comb ring laser for broadband dual-comb spectroscopy[J]. *Optica*, 2016, 3(7): 748-753.
- [54] Mehravar S, Norwood R A, Peyghambarian N, et al. Real-time dual-comb spectroscopy with a free-running bidirectionally mode-locked fiber laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(23): 231104.
- [55] Olson J, Ou Y H, Azarm A, et al. Bi-directional mode-locked thulium fiber laser as a single-cavity dual-comb source[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(20): 1772-1775.
- [56] Li Y M, Yin K, Zhang X, et al. All-fiber bidirectional mode-locked ultrafast fiber laser at 2 μm[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 7105708.
- [57] Huang S W, Li B W, Xing J, et al. Bidirectional mode-locked all-normal dispersion fiber laser[J]. *Optica*, 2020, 7(8): 961-964.
- [58] Chernysheva M, Araimi M A, Khashi H, et al. Isolator-free switchable uni- and bidirectional hybrid mode-locked erbium-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 15721-15729.
- [59] Krylov A A, Chernykh D S, Arutyunyan N R, et al. Generation regimes of bidirectional hybridly mode-locked ultrashort pulse erbium-doped all-fiber ring laser with a distributed polarizer[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(15): 4201-4209.
- [60] Nakajima Y, Hata Y Y, Minoshima K. High-coherence ultra-broadband bidirectional dual-comb fiber laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 5931-5944.
- [61] Kayes M I, Abdurkerim N, Rekik A, et al. Free-running mode-locked laser based dual-comb spectroscopy[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(23): 5809-5812.
- [62] Liu X Y, Li Z, Pan D H, et al. All-polarization-maintaining bidirectional dual-comb fiber laser by nonlinear polarization evolution [C] // *26th Optoelectronics and Communications Conference*, July 3-7, 2021, Hong Kong, China. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2021: T3C.5.
- [63] Liu B W, Luo Y Y, Xiang Y, et al. Multiplexed ultrafast fiber laser emitting multi-state solitons[J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 27461-27471.
- [64] Yang R T, Sun H, Hu P C, et al. Experimental exploration of mode-locking evolution mechanism in dual-ring fiber laser[J]. *Optik*, 2020, 208: 163899.
- [65] 张新亮, 赵延菁. 微腔光频梳研究进展[J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 0823014.
- Zhang X L, Zhao Y J. Research progress of microresonator-based optical frequency combs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(8): 0823014.
- [66] Zhao X, Silver J M, Bino L D, et al. Dual comb generation in a single microresonator[C]//*Conference on Lasers and Electro-Optics*, May 14-19, 2017, San Jose, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2017: STh3L.4.
- [67] Bao C Y, Suh M G, Vahala K. Microresonator soliton dual-comb imaging[J]. *Optica*, 2019, 6(9): 1110-1116.
- [68] Menyuk C R. Stability of solitons in birefringent optical fibers. I: equal propagation amplitudes[J]. *Optics Letters*, 1987, 12(8): 614-616.
- [69] Cundiff S T, Collings B C, Knox W H. Polarization locking in an isotropic, modelocked soliton Er/Yb fiber laser[J]. *Optics Express*, 1997, 1(1): 12-20.
- [70] Akhmediev N N, Soto-Crespo J M, Cundiff S T, et al. Phase locking and periodic evolution of solitons in passively mode-locked fiber lasers with a semiconductor saturable absorber[J].

- Optics Letters, 1998, 23(11): 852-854.
- [71] Zhao L M, Tang D Y, Zhang H, et al. Polarization rotation locking of vector solitons in a fiber ring laser [J]. Optics Express, 2008, 16(14): 10053-10058.
- [72] Gong Z, Zhao X, Hu G Q, et al. Polarization multiplexed, dual-frequency ultrashort pulse generation by a birefringent mode-locked fiber laser [C] // 2014 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)-Laser Science to Photonic Applications, June 8-13, 2014, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2014.
- [73] Zhao X, Gong Z, Liu Y, et al. Coherent asynchronous sampling distance measurement using a single polarization-multiplexed ultrafast laser [C] // 2014 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)-Laser Science to Photonic Applications, June 8-13, 2014, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2014.
- [74] Liu Y, Zhao X, Zhao B F, et al. High-resolution, dual-comb spectroscopy enabled by a polarization-multiplexed, dual-comb femtosecond fiber laser [C] // 2016 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), June 5-10, 2016, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016.
- [75] Akosman A E, Sander M Y. Dual comb generation from a mode-locked fiber laser with orthogonally polarized interlaced pulses [J]. Optics Express, 2017, 25(16): 18592-18602.
- [76] Sterczewski Ł A, Przewłoka A, Kaszub W, et al. Computational Doppler-limited dual-comb spectroscopy with a free-running all-fiber laser [J]. APL Photonics, 2019, 4(11): 116102.
- [77] Uyama K, Shirahata T, Jin L, et al. All-PM dual-comb fiber ring laser using CNT-SA [C] // 2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 10-15, 2020, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [78] Nakajima Y, Hata Y Y, Minoshima K. All-polarization-maintaining, polarization-multiplexed, dual-comb fiber laser with a nonlinear amplifying loop mirror [J]. Optics Express, 2019, 27(10): 14648-14656.
- [79] Vedala G, Hui R Q. Auto-start mechanism of a polarization-multiplexed dual-frequency femtosecond fiber laser [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, May 13-18, 2018, San Jose, California. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2018: JW2A.147.
- [80] Link S M, Maas D J H C, Waldburger D, et al. Dual-comb spectroscopy of water vapor with a free-running semiconductor disk laser [J]. Science, 2017, 356(6343): 1164-1168.
- [81] Kowalczyk M, Sterczewski Ł, Zhang X Z, et al. Dual-comb femtosecond solid-state laser with inherent polarization-multiplexing [J]. Laser & Photonics Reviews, 2021, 15(8): 2000441.
- [82] Liang H C, Wu C S. Diode-pumped orthogonally polarized self-mode-locked Nd:YLF lasers subject to gain competition and thermal lensing effect [J]. Optics Express, 2017, 25(12): 13697-13704.
- [83] Willenberg B, Pupeikis J, Krüger L M, et al. Femtosecond dual-comb Yb:CaF<sub>2</sub> laser from a free-running polarization-multiplexed cavity for rapid optical sampling [C] // Advanced Solid State Lasers 2020, October 13-16, 2020, Washington, D. C., USA. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2020: AF1A.2.
- [84] Chen J, Zhao X, Yao Z J, et al. Dual-comb spectroscopy of methane based on a free-running Erbium-doped fiber laser [J]. Optics Express, 2019, 27(8): 11406-11412.
- [85] Modsching N, Drs J, Brochard P, et al. High-power dual-comb thin-disk laser oscillator for fast high-resolution spectroscopy [J]. Optics Express, 2021, 29(10): 15104-15113.
- [86] Zhao X, Li Q, Yin S Y, et al. Dual-comb dynamic interrogation of fiber Bragg grating with one mode-locked fiber laser [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(16): 6621-6626.
- [87] Zhao X, Yang J J, Liu J S, et al. Dynamic quasi-distributed ultraweak fiber Bragg grating array sensing enabled by depth-resolved dual-comb spectroscopy [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(8): 5821-5827.
- [88] Xu K, Ma L H, Chen J, et al. Dual-comb spectroscopy for laminar premixed flames with a free-running fiber laser [J]. Combustion Science and Technology, 2022, 194(12): 2523-2538.
- [89] Kuse N Y, Ozawa A, Kobayashi Y. Static FBG strain sensor with high resolution and large dynamic range by dual-comb spectroscopy [J]. Optics Express, 2013, 21(9): 11141-11149.
- [90] Guo J J, Ding Y H, Xiao X S, et al. Multiplexed static FBG strain sensors by dual-comb spectroscopy with a free running fiber laser [J]. Optics Express, 2018, 26(13): 16147-16154.
- [91] Guo J J, Zhao K J, Zhou B Q, et al. Wearable and skin-mountable fiber-optic strain sensors interrogated by a free-running, dual-comb fiber laser [J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(12): 1900086.
- [92] Hu G Q, Mizuguchi T, Zhao X, et al. Measurement of absolute frequency of continuous-wave terahertz radiation in real time using a free-running, dual-wavelength mode-locked, erbium-doped fibre laser [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 42082.
- [93] Li C, Zhao X, Li R X, et al. Dead-band-free, real-time high-resolution microwave frequency measurement with a multi-comb laser [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, May 14-19, 2017, San Jose, California. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2017: STh3L.3.
- [94] Zhao X, Li C, Li T, et al. Dead-band-free, high-resolution microwave frequency measurement using a free-running triple-comb fiber laser [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 1101008.
- [95] Hu G Q, Mizuguchi T, Oe R, et al. Dual terahertz comb spectroscopy with a single free-running fibre laser [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 11155.
- [96] Baker R D, Yardimci N T, Ou Y H, et al. Self-triggered asynchronous optical sampling terahertz spectroscopy using a bidirectional mode-locked fiber laser [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 14802.
- [97] Chen J, Nitta K, Zhao X, et al. Adaptive-sampling near-Doppler-limited terahertz dual-comb spectroscopy with a free-running single-cavity fiber laser [J]. Advanced Photonics, 2020, 2(3): 036004.
- [98] 吴冠豪, 周思宇, 杨越棠, 等. 双光梳测距及其应用 [J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1504002.  
Wu G H, Zhou S Y, Yang Y T, et al. Dual-comb ranging and its applications [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1504002.
- [99] Zhao X, Zheng Z, Liu Y, et al. High-resolution absolute distance measurement using a dual-wavelength, dual-comb, femtosecond fiber laser [C] // 2012 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 6-11, 2012, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2012.
- [100] Liu L, Zhao X, Wang Q, et al. Fast, asynchronous sampling distance ranging using an SOA gate and a dual-wavelength mode-locked fiber laser [C] // 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEOPR), June 30-July 4, 2013, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2013.
- [101] Zheng Z, Zhao X. High-resolution, dual-comb asynchronous sampling enabled by dual-wavelength ultrafast fiber lasers and its applications [C] // 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEOPR), June 30-July 4, 2013, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2013.
- [102] Lin B K, Zhao X, He M Z, et al. Dual-comb absolute distance measurement based on a dual-wavelength passively mode-locked laser [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(6): 7106508.
- [103] Li Y P, Cai Y W, Li R M, et al. Large-scale absolute distance measurement with dual free-running all-polarization-

- maintaining femtosecond fiber lasers [J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(9): 091202.
- [104] Fellingner J, Winkler G, Aldia P E C, et al. Simple approach for extending the ambiguity-free range of dual-comb ranging [J]. Optics Letters, 2021, 46(15): 3677-3680.
- [105] Nürnberg J, Willenberg B, Phillips C R, et al. Dual-comb ranging with frequency combs from single cavity free-running laser oscillators [J]. Optics Express, 2021, 29(16): 24910-24918.
- [106] Zhao X, Zheng Z, Liu L, et al. Fast, long-scan-range pump-probe measurement based on asynchronous sampling using a dual-wavelength mode-locked fiber laser [J]. Optics Express, 2012, 20(23): 25584-25589.
- [107] Kolano M, Boidol O, Molter D, et al. Single-laser, polarization-controlled optical sampling system [J]. Optics Express, 2018, 26(23): 30338-30346.
- [108] Nussbaum-Lapping A, Pupeikis J, Willenberg B, et al. Complete SESAM characterization via equivalent time sampling using a free-running dual-comb laser [C]//CLEO: Science and Innovations 2021, May 9-14, 2021, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2021: STu2E.5.
- [109] Hu G Q, Pan Y L, Zhao X, et al. Asynchronous and synchronous dual-wavelength pulse generation in a passively mode-locked fiber laser with a mode-locker [J]. Optics Letters, 2017, 42(23): 4942-4945.
- [110] Wei Y, Li B W, Wei X M, et al. Ultrafast spectral dynamics of dual-color-soliton intracavity collision in a mode-locked fiber laser [J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(8): 081104.
- [111] Liu M, Li T J, Luo A P, et al. "Periodic" soliton explosions in a dual-wavelength mode-locked Yb-doped fiber laser [J]. Photonics Research, 2020, 8(3): 246-251.
- [112] Yu Y, Kong C H, Li B W, et al. Behavioral similarity of dissipative solitons in an ultrafast fiber laser [J]. Optics Letters, 2019, 44(19): 4813-4816.
- [113] Kudelin I, Sugavanam S, Chernysheva M. Build-up dynamics in bidirectional soliton fiber lasers [J]. Photonics Research, 2020, 8(6): 776-780.
- [114] Zhou Y, Ren Y X, Shi J W, et al. Breathing dissipative soliton molecule switching in a bidirectional mode-locked fiber laser [J]. Advanced Photonics Research, 2022, 3(4): 2100318.
- [115] Zhao K J, Gao C X, Xiao X S, et al. Real-time collision dynamics of vector solitons in a fiber laser [J]. Photonics Research, 2021, 9(3): 289-298.
- [116] Zhao K J, Gao C X, Xiao X S, et al. Buildup dynamics of asynchronous vector solitons in a polarization-multiplexed dual-comb fiber laser [J]. Optics Letters, 2020, 45(14): 4040-4043.
- [117] Lomsadze B, Smith B C, Cundiff S T. Tri-comb spectroscopy [J]. Nature Photonics, 2018, 12(11): 676-680.
- [118] 卢敏健, 武韬, 李岩, 等. 双光梳非线性光谱 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 0100001.
- [119] Lu M J, Wu T, Li Y, et al. Dual-comb nonlinear spectroscopy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0100001.
- [119] Li T, Zhao X, Chen J, et al. Tri-comb and quad-comb generation based on a multi-dimensional multiplexed mode-locked laser [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(20): 5178-5184.
- [120] Yang R T, Sun H, Lv H S, et al. A multidimensional multiplexing mode-locked laser based on a dual-ring integrative structure for tri-comb generation [J]. Applied Sciences, 2020, 10(22): 8260.
- [121] Li T, Zhao X, Chen J, et al. Absolute distance measurement with a long ambiguity range using a tri-comb mode-locked fiber laser [C]//CLEO: Science and Innovations 2019, May 5-10, 2019, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2019: SM2H.1.
- [122] Yang J J, Liu J S, Li T, et al. Dynamic spectroscopic characterization for fast spectral variations based on dual asynchronous undersampling with triple optical frequency combs [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 156: 107077.

## Single-Cavity Dual-Comb Technology

Zhao Xin\*, Yang Jianjun, Zhang Liqian, Zheng Zheng

*School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China*

### Abstract

**Significance** Optical frequency comb (OFC), often dubbed as "the ruler in the frequency domain" and a "bridge" between microwave and optical frequencies, plays an important role in time and frequency metrologies. Among these OFC technologies, the one leveraging two OFCs with slightly different comb tooth spacings, that is, dual-comb technology, has been the most thoroughly studied one in recent years. It has been utilized in various applications such as absorption spectroscopy, absolute distance ranging, pump-probe measurement, and radio-frequency spectrum measurement, as it can realize high-resolution and broadband optical measurements. Based on the conventional optical frequency comb technology, dual optical combs are generated using two independent mode-locked lasers with slightly different frequencies. However, the need for complicated feedback control and laser systems to maintain mutual coherence between the dual combs could be a key bottleneck for this technology when moving towards on-site detection and a broader application range. The generation of high-quality dual-optical frequency combs with low complexity has become a popular topic in dual-comb technology research.

The single-cavity dual-comb technology that realizes high-coherence dual-optical frequency comb generation with one laser has become a prominent research direction in current optical frequency comb technology. This has significantly contributed to the advancement of low-complexity dual-comb technology. This study reviews the development of single-cavity dual-comb technology from a broad perspective, specifically focusing on the single-cavity dual-comb fiber lasers that have been extensively explored over the past decade. Various technical pathways to implement single-cavity dual-comb

sources and their characteristics are summarized, as well as the new directions for further developing this technology.

**Progress** Studies on ultrafast lasers have traditionally focused on achieving shorter pulse width, higher power, and lower noise. Ensuring the generation of a single pulse train in the laser cavity is the preferred choice for realizing high-quality mode-locked lasers. However, for dual-comb sources, the mutual stability between two pulse sequences, instead of the stability of a single optical comb, is the key performance target. Over the past decade, to develop dual-comb lasers with good mutual coherence, researchers worldwide have designed various lasers based on the concept of multiplexed mode-locked laser ( $M^2L^2$ ), an idea introduced by our group. Because both combs share a laser cavity,  $M^2L^2$  can realize good passive mutual coherence of the output combs without active stabilization. Thus far, four types of multiplexing methods, namely, wavelength-, directional-, polarization-, and pulse shape multiplexing, corresponding to different physical dimensions of optical pulses, have been studied to generate dual combs from a single cavity. These are illustrated in Fig. 1, and their corresponding performances are summarized in Table 1.

The advantages of the single-cavity dual-comb (SCDC) technique pave the way for realizing low-complexity dual-comb systems. Dual-comb measurement techniques can be divided into two categories: time-domain and frequency-domain measurements, which impose different requirements on the coherence and frequency stability of dual combs. Because the single-cavity dual-comb laser is significantly different from the traditional fully referenced dual-comb source in terms of power, spectral width, repetition rate difference, coherence, and stability, it is necessary to validate the applicability of SCDC lasers to existing dual-comb applications. All major dual-comb applications, such as optical spectroscopy, terahertz spectroscopy, ranging, and pump-probe measurements, have been demonstrated using SCDC lasers (Fig. 6).

Although the shared cavity design of SCDC sources yields considerable advantages in terms of overall system complexity and cost, there could be inevitable periodic collisions between two ultrashort pulses in such a laser cavity. This is fundamentally different from undisturbed pulse propagation in conventional single-pulse-train mode-locked lasers. Thus, this could be an interesting research subject, as well as a potential engineering challenge. Therefore, several studies have recently been conducted on pulse interaction in SCDC lasers with different multiplexing methods (Fig. 11).

Moreover, novel measurement schemes leveraging more than two combs have shown new capabilities required by certain applications. However, such light sources based on frequency-stabilized combs are considerably complex and expensive. Therefore, single-cavity multi-comb technology could be an attractive alternative solution. The concept of a multidimensional multiplexed mode-locked laser ( $M^3L^2$ ) has been proposed to realize single-cavity triple-comb and multi-comb generation. Several demonstrations, such as dead-band-free high-resolution microwave frequency measurement, real-time absolute distance measurement with increased ambiguity range, and dynamic spectroscopic characterization for fast spectral variations based on the single-cavity tri-comb laser and quad-comb laser, have been demonstrated (Figs. 12 and 13).

**Conclusions and Prospects** CDC technology, owing to its unique advantages in system complexity, power consumption, and cost, has grown extensively over the past decades. From an often-overlooked phenomenon in the labs, it has been transformed into a major driving force with the potential to propel dual-comb technology into out-of-lab applications. Owing to the unique multiplexed optical cavity structure and intracavity dual-comb pulse dynamics, related studies span various topics, from fundamental soliton physics to engineering solutions. However, some technical challenges remain to be overcome before it can become truly successful in real-world applications. The trade-off and balance between these performance parameters in SCDC systems, such as the tunability and stability of the repetition frequency difference, pulse energy, and mutual interaction, and the associated intriguing physics behind them, could further motivate the academia to conduct innovative investigations.

**Key words** lasers; single-cavity dual combs; optical frequency comb; dual combs; fiber lasers