

单腔双光梳锁模光纤激光器及其应用研究进展

杨昌喜^{1*}, 赵康俊¹, 曹博¹, 高晨心¹, 肖晓晟²

¹清华大学精密仪器系精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084;

²北京邮电大学电子工程学院信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

摘要 双光梳光谱技术作为一种新兴的宽带光谱测量技术,具有超高分辨率、高灵敏度和高采样率的特点,在气体吸收谱测量、温室气体排放监控、非线性光谱成像等领域具有重要应用。研究表明,仅从一台激光器中产生高相干的双光梳光源,克服了传统双光梳光源产生方法中存在的频率锁定系统复杂、梳齿数量较少、制作工艺困难等缺点,这种光源是理想的双光梳光源之一。结合国内外相关研究进展,综述了单腔双光梳的产生方法、单腔双光梳锁模光纤激光器中的孤子动力学研究以及单腔双光梳的应用。

关键词 激光器; 双光梳光谱技术; 单腔双光梳; 锁模光纤激光器

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1501001

1 引言

光学频率梳^[1](简称光频梳)是在频域上具有一系列等间隔的频率梳齿,在时域上周期性排布的激光脉冲。具有高稳定性的光频梳极大地提升了光学频率测量的准确度,给计量科学带来了一场技术革命,同时也催生了一些新的研究领域和方向,如光原子钟^[2-4]、精密光谱^[5]、绝对距离测量^[6]、天文物理^[7]等,在基础科学和应用领域等方面均表现出极大的发展前景。近年来,新兴的双光梳光谱技术^[8-10]采用两套高相干、频率梳齿间隔略微不同的光频梳进行宽带光谱测量,具有超高分辨率、高灵敏度和高采样率等优点,在气体吸收谱测量^[8]、温室气体排放监控^[11]、非线性光谱成像^[12-14]等领域均有重要应用。目前双光梳光源的产生方法主要包括对两台独立锁模激光器进行梳齿频率锁定^[15],或者对同一个连续激光光源进行不同频率的电光调制^[16],再或者在微环谐振腔中形成两套稳定的克尔光频梳^[17],但以上方法存在频率锁定系统复杂、梳齿数量较少、器件制作工艺困难等缺点。而最近研究表明,可以在同一台锁模激光器中利用不同效应获得两套稳定的锁模

脉冲串,如方向复用^[18]、波长复用^[19]或者偏振复用^[20]等。两套锁模脉冲在同一激光器中经历相同的环境,有效抑制了共模噪声,使得锁模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,因此被称为单腔双光梳。单腔双光梳既维持了两套光频梳间的高相干性,又极大地简化了双光梳系统的复杂性。

锁模光纤激光器因具有结构简单紧凑、光束输出质量良好、散热性和稳定性良好等优点而引起人们广泛关注。本文对单腔双光梳锁模光纤激光器及其应用研究进展进行了归纳总结。首先,简单介绍光学频率梳和双光梳的基本概念、工作原理和产生方法;其次,依次介绍单腔双光梳锁模光纤激光器中方向复用、波长复用、偏振复用和腔空间复用的双光梳产生方法及研究进展;接着,对单腔双光梳锁模光纤激光器中锁模脉冲的起振、碰撞等非线性动力学过程的进展进行报道与讨论;然后,对单腔双光梳锁模光纤激光器在吸收谱测量、测距、光纤传感等领域的应用研究进展进行报道与总结;最后,总结全文并指出后续可能进一步开展的工作。

收稿日期: 2021-03-12; 修回日期: 2021-04-23; 录用日期: 2021-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(61077032, 61177046, 61377039, 61975090)

通信作者: *cxyang@tsinghua.edu.cn

2 光学频率梳与双光梳

2.1 光学频率梳基本原理

光学频率梳在频域上表现为一系列等间隔的频率梳齿,在时域上表现为一系列周期性的脉冲,如图 1(a)和图 1(b)所示^[5]。其中,光频梳的梳齿间距 f_{rep} 与脉冲周期 T 满足 $T=1/f_{\text{rep}}$ 。由于不同频率的光在色散介质中的传输速度不同,脉冲载波与包络之间产生微小的相位差 $\Delta\varphi_{\text{cep}}$,导致光频梳频率梳齿相对原点平移 f_{ceo} 。因此,光频梳各个梳齿的频率可以表示为 $f_m = mf_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}$,其中: f_{rep} 通常被称为重复频率,简称重频; f_{ceo} 通常被称为载波包络偏移频率,简称偏频。

利用锁模激光器获得稳定的超短脉冲串是产生光频梳的主要手段之一。但是,自由运转下的激光器受外界环境的影响,输出光频梳的重频和偏频会在短时间内发生抖动,在长时间内发生漂移,因此需要通过一定的技术手段将重频和偏频同时稳定,来获得稳定的光频梳。重频可由光电探测器直接检测

输出脉冲串来获得,并通过伺服反馈系统对激光器腔长进行主动控制,以达到稳定重频的效果。而偏频的提取较为复杂,常规方法是采用 $f-2f$ 自参考法^[21]:将超短脉冲注入高非线性介质中扩展其光谱范围并使其达到跨倍频程效果,将光频梳的第 m 根梳齿倍频与第 $2m$ 根梳齿拍频获取偏频信息 f_{ceo} ,如图 1(c)所示,然后同样通过伺服反馈系统控制激光器的泵浦电流来稳定偏频。此外,也可以采用两台不同波长的超稳连续激光对相近梳齿进行频率锁定^[22],达到重频和偏频同时锁定的效果,如图 1(d)所示。

重频和偏频锁定后的光频梳具有超高的稳定性,可用于光谱精密计量,比如气体吸收谱计量^[5]。某些气体分子键的振动会在光频波段产生强烈的吸收峰,形成特定的分子指纹信息。光频梳通过气体时将携带其吸收谱信息,这些信息可利用精密光谱仪进行光谱检测来获取。但精密光谱仪通常价格昂贵、光谱分辨率有限、测量速度较慢,这并不利于气体吸收谱的精准、快速测量。

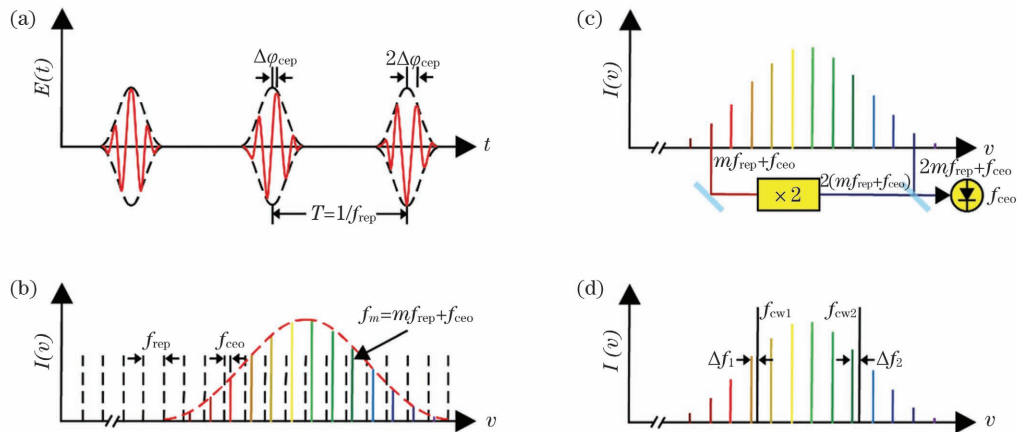


图 1 光频梳。(a)时域及(b)频域特性;(c)光频梳 $f-2f$ 自参考锁定技术;(d)两台超稳连续激光锁定光频梳

Fig. 1 Optical frequency comb. (a) Temporal and (b) spectral features of optical frequency comb; (c) optical frequency comb stabilized by $f-2f$ self-reference technique; (d) optical frequency comb stabilized by two ultrastable continuous-wave (CW) lasers

2.2 双光梳基本原理

双光梳光谱技术通过采用两套高相干、重频略微不同的光频梳 1 和光频梳 2,在不需机械扫描移动装置的情况下将光频梳的光频信息一一映射到射频域,有效提升了测量精度和速度。其原理如图 2(a)和图 2(b)所示^[8, 23],光频梳 1 的第 m 根梳齿的频率为 $f_m^{(1)} = mf_{r1} + f_{\text{ceo1}}$,光频梳 2 的第 m 根梳齿的频率为 $f_m^{(2)} = mf_{r2} + f_{\text{ceo2}}$,两者拍频获得 $f_{\text{RF}} = m\Delta f_r + \Delta f_{\text{ceo}}$,其中 $\Delta f_r = |f_{r1} - f_{r2}|$,

$\Delta f_{\text{ceo}} = |f_{\text{ceo1}} - f_{\text{ceo2}}|$ 。因此,两套光频梳拍频后以 $f_r/\Delta f_r$ 的比例关系在射频域形成一系列间隔为 Δf_r 的射频频率梳,通过探测射频域的梳齿信息即可获得光频域的光频梳信息。双光梳光谱技术从时域上可理解为两路不同重频的脉冲串之间的线性异步光学采样^[24-25],以 $1/f_{r1}$ 的时间间隔进行采样,获得周期为 $1/\Delta f_r$ 的时域干涉信号,如图 2(c)和图 2(d)所示。将该周期性时域干涉信号进行傅里叶变换即可获得图 2(b)所示的射频频率梳。

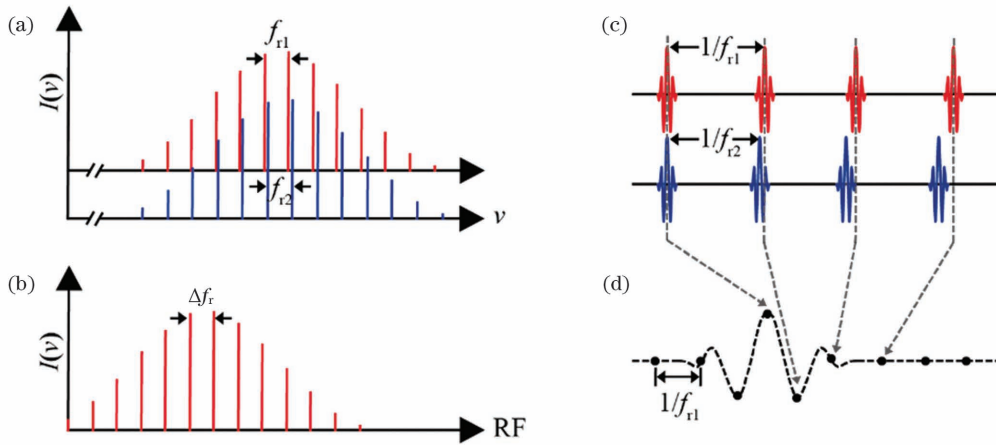


图 2 双光梳特性。(a)光频域特性;(b)射频域特性;(c)时域特性;(d)时域干涉信号

Fig. 2 Dual combs features. (a) Optical frequency domain; (b) radio frequency domain; (c) time domain; (d) temporal interferogram

将双光梳光谱技术用于气体吸收谱测量,通常有两种方式。第一种是将光频梳 1 作为本振光梳,光频梳 2 作为信号光梳,光频梳 2 通过待测气体后与光频梳 1 会合并由光电探测器探测拍频信号,傅里叶变换后获得携带气体吸收谱信息的射频频谱信号。另外,将未通过待测气体的光频梳 2 直接与光频梳 1 会合,获得的射频频谱信号作为参考信号,并与前者比较获得射频频谱的气体吸收谱信息,通过 $f_r/\Delta f_r$ 的比例关系得到气体分子在光频域的吸收强度和相位信息。第二种是将光频梳 1 和光频梳 2 同时通过待测气体,并与未通过待测气体的信号比较,可以获得气体分子在光频域的吸收强度信息,但无法获得相位信息。

通过以上原理可以看出:双光梳光谱技术中两路脉冲串可实现自动扫描,无需外部机械装置,具有结构简单的优点;通过调节两路脉冲串的重频差至 kHz/MHz 量级,可实现 ms/ μ s 量级的测量速度,具有快速测量的优点;对测量信号进行多次相干平均,可有效提升信号的信噪比,可以在保证测量精度的前提下快速测量;整个测量系统仅需两个普通的光电探测器,有效降低了系统测量成本。因此,双光梳光谱技术相比于单光梳直接测量方法具有无可比拟的优势。

除了气体吸收谱测量,双光梳在测距、光纤传感等领域同样具有重要应用,其将在第 5 部分进行详细介绍。

2.3 双光梳的产生方法

产生稳定可靠且高相干性的双光梳光源是双光梳光谱测量中至关重要的环节。目前主要有以下几种产生双光梳的方式。

第一种方式是搭建两台独立的锁模激光器,并通过电路反馈系统对两套光频梳进行相位锁定,如图 3(a)所示。2018 年,美国国家标准与技术研究院 NIST 的 Newbury 等^[23]利用非线性光学扩谱和 $f-2f$ 自参考方式获得两套跨倍频程的光频梳,并利用 $1.07 \mu\text{m}$ 和 $1.35\sim 1.75 \mu\text{m}$ 的光差频产生 $2.6\sim 5.2 \mu\text{m}$ 的中红外双光梳光源。美国中佛罗里达大学的 Vodopyanov 等^[26]利用两台相位锁定的掺铈光频梳同步泵浦简并的光学参量振荡器,产生了 $3.1\sim 3.5 \mu\text{m}$ 的中红外双光梳,相对梳齿线宽达到 25 mHz 。此外,还可将两套光频梳同时锁定至两台超稳连续激光器^[15, 27],或者使用自适应方法通过电路系统对光频梳的频率抖动进行实时补偿校正^[28]。但以上方法均需复杂的电路反馈系统,成本高昂、体积庞大,不便于实验室外使用。

第二种方式是对同一个连续激光光源进行不同频率的电光调制,以获得具有较少梳齿的双光梳,经过放大器放大和高非线性光纤扩谱后获得可应用的电光双光梳,如图 3(b)所示。2016 年德国马普所的 Picqué 等采用该方法获得 $1.5 \mu\text{m}$ 的双光梳光源,并对 CO_2 和 HCN 气体吸收谱进行测量,刷新速率达到 80 kHz ^[16],将其与 $1 \mu\text{m}$ 连续激光差频可产生中心波长为 $3 \mu\text{m}$ 的中红外双光梳^[29]。电光双光梳的重频及重频差完全由加载在电光调制器上的射频频率决定,很容易实现 GHz 以上的重频和 kHz/MHz 以上的重频差,极大地提升了测量速度,并且调节灵活。另外,由于两套光频梳均源自同一个连续激光光源,两者之间具有固有的相干性,不需要复杂的电路稳频系统。但是,由电光调制器直接调制出的梳齿数量较少,需要放大和非线性扩谱等

操作来增加其光谱范围,增加了系统复杂性。

第三种方式是利用连续激光泵浦高品质因子的微环谐振腔,通过级联四波混频效应产生片上克尔微腔双光梳,如图 3(c)所示。2016 年美国加州理工学院的 Vahala 等^[17]使用两台连续激光器泵浦两个略微不同的二氧化硅微腔,产生两个梳齿间距略微不同的克尔光频梳。之后,该课题组^[30]仅使用一台连续激光器双向泵浦单个二氧化硅微腔,并用声光调制器微调连续激光频率,通过拉曼自频移效应产生克尔双光梳,有效降低了系统复杂性。除此之外,瑞士洛桑联邦理工学院的 Kippenberg 等^[31]还通过连续激光泵浦微腔中的不同空间模式群实现了空分复用的克尔双光梳。克尔微腔双光梳可通过调整微腔长度实现数十至数百 GHz 以上的重频,重频差亦

可轻松达到 kHz/MHz 以上,因此具有极高的双光梳测量速度。但是,克尔光频梳通常需要微腔具有极高的品质因子,对半导体工艺要求较高;过大的梳齿间隔也限制了其光谱分辨率;精密的泵浦失谐量调节同样加大了获得高相干克尔光频梳的困难。

第四种方式是在同一台锁模激光器中产生两套不同重频的锁模脉冲,如图 3(d)所示。2016 年日本东京大学的 Ideguchi 等^[32]在钛蓝宝石激光器中获得了双向锁模的单腔双光梳,通过调节钛蓝宝石晶体、腔镜和泵浦光聚焦透镜的位置可在 100~800 Hz 内实现重频差的灵活调节。与前三种双光梳的产生方式相比,两脉冲在谐振腔中经历的环境相同,有效的共模噪声抑制能够保证激光器在自由运转情况下实现光频梳之间的高相干性,极大地简化了系统复杂性。

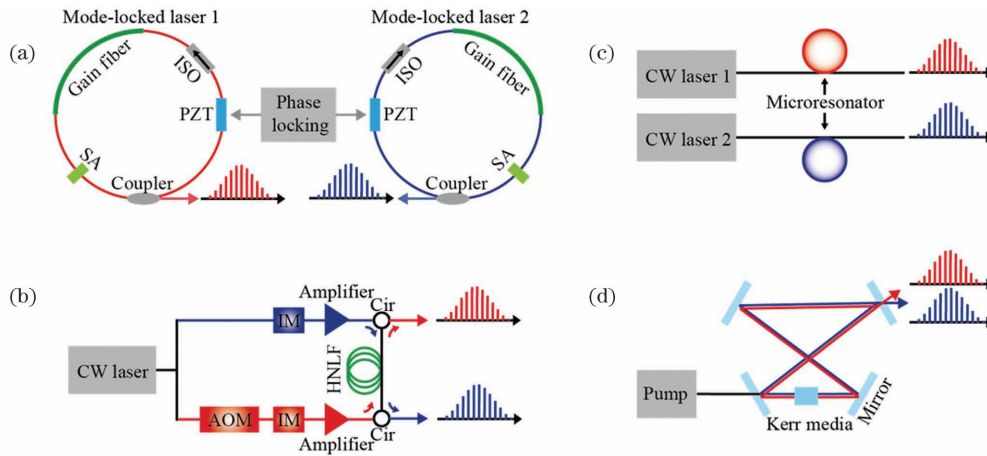


图 3 双光梳的产生。(a)两台独立锁模光纤激光器进行相位锁定;(b)同一个连续激光光源进行不同频率的电光调制;(c)微环谐振腔中形成两套稳定的克尔光频梳;(d)同一台激光器中产生两套不同重复频率的锁模脉冲

Fig. 3 Generation of dual combs. (a) Phase locking of two independent mode-locked fiber lasers; (b) electro-optic modulation on a CW laser with different radio frequencies; (c) generation of two stable Kerr frequency combs formed in the microring resonator; (d) generation of two mode-locked pulses from a single laser cavity with different repetition rates

3 单腔双光梳锁模光纤激光器

光纤激光器中的多种锁模机理及脉冲整形过程使得同一台锁模光纤激光器中输出双光梳甚至多光梳的途径有多种^[19, 33]。

3.1 方向复用

首个方向复用锁模激光器可追溯到 1967 年,美国斯坦福大学的 Buholz 等^[34]在一台 He-Ne 环形激光器中插入强度调制器,对两个方向的激光进行强度调制,达到了主动锁模效果。随后,美国贝尔实验室的 Fork 等^[35]利用新颖的碰撞锁模技术在一台染料激光器中获得稳定的双向同步锁模脉冲。2008 年,美国亚利桑那大学的 Kieu 等^[36]报道了一

种全光纤化的双向掺铒被动锁模激光器,如图 4(a)所示,该激光器中没有加入光纤隔离器,因此,顺时针和逆时针方向的光场在激光腔内以不同顺序经历光纤及光纤器件,导致双向锁模脉冲具有略微不同的重复频率,形成双光梳。共模噪声抑制决定该自由运转的双向锁模光纤激光器输出的双光梳具有固有的高相干特性,在 HCN 气体吸收谱的测量中^[18]双光梳展现出优异的性能。2018 年, Kieu 等^[37]利用类似的结构通过控制腔内双折射实现了 49.8~229 Hz 的重频差调节。但是,该方法中重频差的调节范围受限,实现更高的重频差较为困难。

激光器普遍工作于净负腔色散,导致方向复用双光梳的光谱范围(仅数 nm)和输出能量(50 pJ 以

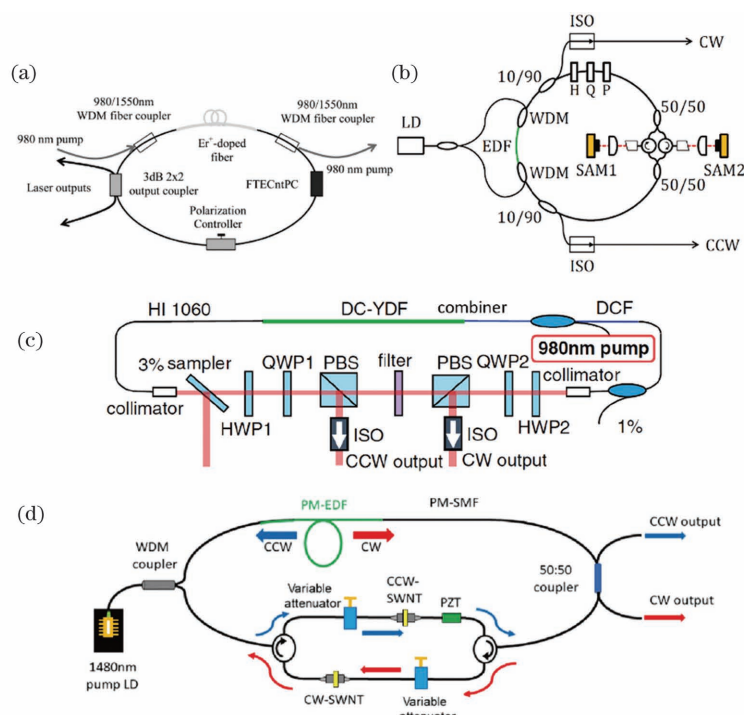


图 4 方向复用锁模光纤激光器。(a)双向掺铒锁模光纤激光器^[36]；(b)重频差灵活可调的双向掺铒锁模光纤激光器^[38]；(c)双向掺镱锁模光纤激光器^[39]；(d)全保偏双向掺铒锁模光纤激光器^[40]

Fig. 4 Bidirectionally multiplexed mode-locked fiber lasers. (a) Bidirectionally erbium-doped mode-locked fiber laser (ED-MLFL)^[36]; (b) repetition rate difference-tunable bidirectionally ED-MLFL^[38]; (c) bidirectionally ytterbium-doped MLFL^[39]; (d) all-polarization-maintaining bidirectionally ED-MLFL^[40]

下)受限。就光谱范围来讲,若实现宽光谱测量需要采用扩谱等手段,但扩谱有可能会引起光频梳相干性降低。因此,2019年日本电气通信大学的Minoshima等^[38]设计了一种小部分非共路的双向掺铒锁模光纤激光器,如图4(b)所示,通过调节非共路部分的光程差可实现双光梳重频差的大范围灵活调控。此外,通过色散管理使腔内净色散至近零,实现了双向锁模脉冲光谱宽度超过50nm的输出特性。就输出能量来讲,实际的工程应用中通常需要对脉冲能量进行放大,增加了系统复杂性。因此,美国科罗拉多大学的Huang等^[39]利用非线性偏振旋转(NPR)技术首次搭建全正色散双向掺镱锁模光纤激光器,如图4(c)所示,工作于耗散孤子区域的双向锁模脉冲在中心波长1070nm处具有超过20nm的光谱宽度,输出脉冲能量超过1nJ。

非保偏光纤中光场的传输易受外界环境影响,长时间工作下激光器的重频可能发生较大漂移,不利于激光器的稳定工作。因此,可通过搭建全保偏光纤激光器来有效提升激光器的长程稳定性。2019年日本名古屋大学的Nishizawa等^[40]利用全保偏光纤器件搭建与图4(b)相似的双向锁模掺铒激光器,如图4(d)所示。腔内非共路两臂依次放置

可调衰减器和碳纳米管(CNT)可饱和吸收器件,分别用于平衡顺时针和逆时针脉冲的增益和损耗^[41]、防止两脉冲重频,以自动同步和保护可饱和吸收器件。该全光纤化的全保偏双向锁模激光器产生的双光梳能够稳定运转超过24h,并且每次自启后的锁模状态基本相同,具有优异的长程稳定性和可重复性。

3.2 波长复用

波长复用同样可以在激光器中产生具有不同群速度的锁模脉冲。通过在锁模光纤激光器内引入周期性正弦频谱滤波器,调节腔参数可以实现双波长甚至多波长锁模^[42-43]。由于不同波长分量的光场在光纤中传输的群速度不同,多波长锁模的多脉冲表现出不同的重复频率。Lyot滤波器^[44-45]是常用的正弦滤波器之一,其通常由起偏器、保偏光纤和偏振控制器组成,其利用光场在保偏光纤快慢轴上传输引入的相位差干涉而成。2016年,北京航空航天大学的Zheng等^[19]在掺铒锁模光纤激光器中插入一个全光纤偏振分束器(PBS)和一段长约0.25m的保偏光纤形成Lyot滤波器,频谱滤波^[46]和腔内损耗调节^[47]效应导致双波长锁模,如图5(a)所示。Zheng等^[48]还发现首尾均携带保偏光纤的在线起偏器同时具有频谱滤波和NPR锁模效果,可在腔内产

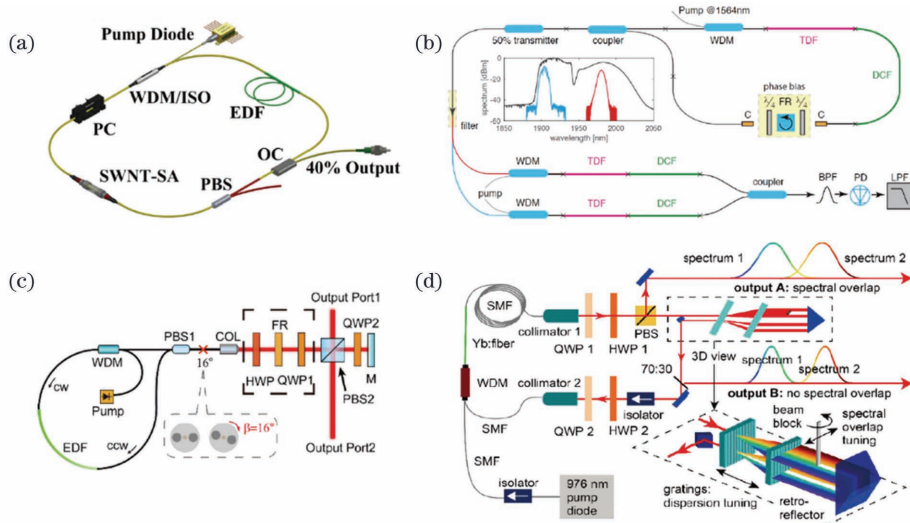


图 5 双波长锁模光纤激光器。(a) 基于 Lyot 滤波器的双波长掺铒锁模光纤激光器^[19]；(b) 基于 Sagnac 滤波器的双波长掺铊锁模光纤激光器^[50]；(c) 全保偏双波长掺铒锁模光纤激光器^[51]；(d) 基于机械滤波器的双波长掺铒锁模光纤激光器^[52]
 Fig. 5 Dual-wavelength MLFLs. (a) Dual-wavelength ED-MLFL based on Lyot filter^[19]；(b) dual-wavelength thulium-doped MLFL based on Sagnac loop filter^[50]；(c) all-polarization-maintaining dual-wavelength ED-MLFL^[51]；(d) dual-wavelength ytterbium-doped MLFL based on mechanical filter^[52]

生具有微小重频差的皮秒和飞秒脉冲。日本丰田工业大学的 Ohishi 等^[49]设计了一种部分保偏的全光纤双波长锁模激光器,将一段长约 0.9 m 的非保偏光纤与长约 4.6 m 的保偏腔结构熔接,通过偏振控制器挤压非保偏光纤实现了 Lyot 滤波器的灵活调节。

此外,Sagnac 滤波器是另外一种正弦频谱滤波器,两脉冲在 Sagnac 环中沿着相反方向传输并在输出端口发生干涉,形成波长相关的正弦滤波器。2018 年,天津大学的 Hu 等^[50]搭建“9 字”型掺铊锁模光纤激光器,利用非线性放大环形镜(NALM)的干涉滤波效应分别在 1917 nm 和 1981 nm 处实现稳定锁模,通过微调两脉冲的中心波长间距可实现 2.8~3.3 kHz 的重频差调节,如图 5(b)所示。Hu 等^[51]还设计了一种基于 Sagnac 滤波器的全保偏掺铒锁模光纤激光器,如图 5(c)所示,将一段长约 0.5 m 的保偏光纤与 NALM 尾端以一定角度熔接,达到双折射干涉滤波效果,最终在 1570 nm 和 1581 nm 处分别获得 1.86 nm 和 2.49 nm 谱宽的双波长锁模。保偏光纤长度可以对滤波器周期进行调节,改变其熔接角度则会影响滤波器整体透过率。该全保偏光纤结构能够保证双光梳超过 90 min 的频率扰动均方根<0.1%,但激光器内部的部分空间结构增加了系统复杂性。

除了 Lyot 滤波器和 Sagnac 滤波器,凹陷滤波器同样可应用于双波长锁模。2019 年,奥地利维也纳大学的 Fellinger 等^[52]将机械式凹陷滤波器引入

到掺铒被动锁模光纤激光器中,实现了稳定的双波长锁模,如图 5(d)所示。腔内光场经过光栅对后在空间色散开来,利用不透光片阻挡部分光场即可过滤掉该波长的光,达到凹陷滤波的效果。通过调节不透光片的空间位置和厚度可灵活调节凹陷滤波器的中心波长和凹陷宽度,达到双光梳重频差灵活调节的效果,实现了重频差在 650 Hz~3 kHz 的调谐。利用相同的方法,Fellinger 等^[53]搭建了基于机械式凹陷滤波器的全保偏掺铒锁模光纤激光器,并对标准具的透射谱进行相关测量。2020 年,波兰弗罗茨瓦夫理工大学的 Sotor 等^[54]利用相似的方式在掺铊光纤激光器中实现了双波长双光梳锁模。

由于单腔双光梳锁模光纤激光器内需要可饱和和吸收体辅助锁模,已报道的文献中大部分采用 CNT^[18-20, 37, 55]、半导体可饱和吸收镜^[38, 56]等器件,而这些器件具有较低的损伤阈值且长时间工作后性能会发生退化。新颖的多模光纤可饱和吸收体^[57-58]可以解决以上难题,具有制作简单、成本低廉、损伤阈值高、长程稳定性好、工作范围宽等优点。2019 年,本课题组^[59]利用多模光纤可饱和吸收体对掺铒光纤激光器进行双波长锁模,获得重频差从 390~700 Hz 可调的双光梳,并对光纤布拉格光栅(FBG)静态应力应变进行测量,结果与光谱仪测量结果高度吻合。

3.3 偏振复用

由于工艺制造中光纤并非完美对称,且应力和

弯曲会导致非保偏单模光纤中存在弱双折射效应,故两个简并正交偏振模式在光纤快慢轴上的折射率并不相同。在非线性偏振耦合和交叉相位调制作用下二者通常能够相互捕获并以相同的群速度在光纤中传输,即矢量孤子^[60-62]。但是,当正交偏振模式之间的非线性相互作用无法补偿光纤双折射引起的群速度失配时,可获得重频略微不同的双光梳。2017年,美国波士顿大学的 Sander 等^[63]利用偏振控制器挤压单模光纤在铥钛共掺锁模激光器中获得了重频差为 510 Hz 的偏振复用双光梳,如图 6(a)所示。由于单模光纤中的双折射效应过于微弱,在普通的单模光纤激光器中产生正交偏振的异步脉冲并不容易。因此,2018年北京航空航天大学 Zheng 等^[20]在掺铥锁模光纤激光器中插入一段长为 0.3 m 的保偏光纤,利用保偏光纤强烈的双折射效应迫使脉冲发生分离,形成稳定的正交偏振异步锁模脉冲。并且,通过补偿腔内色散亦可在净正色散区获得稳定的异步耗散孤子,如图 6(b)所示。之后,波兰弗罗茨瓦夫理工大学的 Sotor 等^[64]采用高

集成化光纤器件有效降低光纤腔长度,实现了重频为 142 MHz、重频差为 3.2 kHz 的偏振复用双光梳输出,并进行了高速、宽光谱的 HCN 气体吸收谱测量。同样,为提高双光梳稳定性,日本电气通信大学的 Minoshima 等^[65]设计了全保偏的 NALM 型掺铥锁模光纤激光器,让两个正交偏振光场沿着不同的路径在保偏光纤的快慢轴分别传输,并通过调节非共路部分的光程差实现重频差的灵活调节,如图 6(c)所示。华东师范大学的 Li 等^[66]同样设计了一种线性保偏掺铥光纤激光器,正交偏振脉冲共路传输,增加了系统的稳定性。但二者均含有空间部分,不利于系统的小型化。为此,日本东京大学的 Yamashita 等^[67]巧妙地设计了一种全光纤化的全保偏偏振复用双光梳激光器,如图 6(d)所示,通过将长约 4.5 m 和 4 m 的保偏光纤 90°熔接来平衡保偏光纤的偏振相关损耗,既能保证正交偏振脉冲具有不同的群速度,又能保证二者之间具有合适的重频差。通过调整两段保偏光纤的长度差可以对双光梳重频差进行调节。

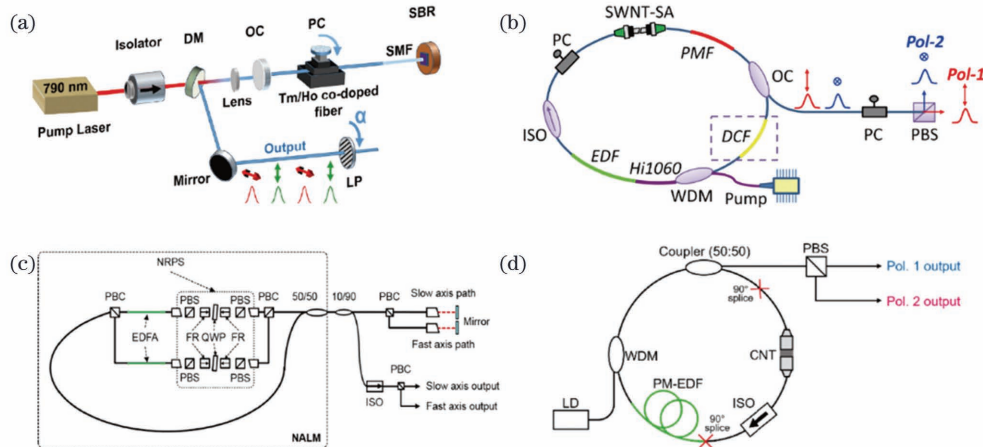


图 6 偏振复用锁模光纤激光器。(a)基于光纤弱双折射的偏振复用掺铥锁模光纤激光器^[63];(b)腔内插入保偏光纤的偏振复用掺铥锁模光纤激光器^[20];(c)全保偏偏振复用掺铥锁模光纤激光器^[65];(d)全保偏全光纤化偏振复用掺铥锁模光纤激光器^[67]

Fig. 6 Polarization-multiplexed MLFLs. (a) Polarization-multiplexed thulium-doped MLFL based on weak fiber birefringence^[63]; (b) polarization-multiplexed ED-MLFL by inserting a polarization-maintaining fiber in the laser cavity^[20]; (c) all-polarization-maintaining polarization-multiplexed ED-MLFL^[65]; (d) all-polarization-maintaining and all-fiber polarization-multiplexed ED-MLFL^[67]

3.4 腔空间复用

3.1 和 3.3 节中有涉及非共路腔空间结构^[38,40,65],不同重频的锁模脉冲在各自谐振腔内循环,通过调节各个谐振腔的腔长可灵活调节两脉冲的重频和重频差,因此该方案相比其他三种复用技术能够产生更高重频差的双光梳光源,在光纤传感等领域的快速测量具有较大的应用价值。2020年,

本课题组^[68]通过搭建共用多模光纤可饱和吸收体的掺铥和掺铥环形谐振腔,验证了该新颖可饱和吸收体的跨波段同时锁模特性,在两谐振腔中分别产生重频为 26.97776 MHz 和 26.44276 MHz 的超短脉冲。后续可通过扩谱等手段将 1.5 μm 脉冲拓宽至 2 μm 附近,作为 2 μm 的双光梳光源进行应用研究。另外,该多模光纤可饱和吸收体的跨波段同时

锁模并不局限于 1.5 μm 和 2 μm , 有望实现更多波段之间的组合, 为多光梳的产生打下基础。目前已有利用腔空间复用结构产生三光梳的报道。2020 年, 哈尔滨工业大学的 Hu 等^[69] 搭建共用增益光纤的双子环激光器, 并在两个谐振腔中加入半导体可饱和吸收体和 NPR 技术实现激光器自启动和调节两腔损耗, 分别获得单脉冲和双波长异步脉冲, 其相互之间的重频差约为 2.74 kHz 和 2.6 MHz。

值得指出的是, 已有的几种产生单腔双光梳的方法均存在不足。通过双波长锁模获得的双光梳光谱并未重叠, 用于光谱计量等应用时通常需要先进行放大和扩谱等操作, 增加了系统整体的复杂性。双向和双偏振锁模获得的双光梳虽然光谱重叠, 但重频差调谐范围有限。尽管非共路结构能够灵活调节重频差, 但是其空间延迟结构同样会造成系统复杂。因此设计新型的全光纤化、具有灵活的重频差调谐性的单腔双光梳激光器仍旧是人们努力的方向之一。

4 单腔双光梳锁模光纤激光器孤子动力学研究

光纤能够支持光学孤子的稳定传输, 被动锁模光纤激光器同样能够产生超短脉冲。与光纤中的孤子传输特性不同的是, 光纤激光器中存在周期性的增益放大和输出损耗, 稳定的超短脉冲需要腔增益、损耗、光纤色散和非线性效应相互平衡, 而且在某些腔参数下, 超短脉冲会向新孤子态演化, 存在丰富的非线性动力学现象, 对这些现象的理论和实验研究一直是人们的研究热点之一。大部分超快非线性动

力学现象能够快速形成并消失且具有不可重复性, 而传统的光学检测仪器受电学带宽和响应速度的限制并不能达到高速测量的需求。时间展宽色散傅里叶变换(TS-DFT)技术作为一种新兴的快速光谱测量手段, 能够轻松解决以上难题。目前, 该技术已广泛应用于锁模光纤激光器中孤子分子内部动力学^[70-71]、孤子起振过程^[72-74]、孤子爆炸^[75-79]、孤子脉动^[80-83]等研究。利用 TS-DFT 技术研究单腔双光梳激光器中的非线性动力学, 不仅有助于加深对孤子动力学的理解, 还对激光器设计有一定的指导意义。

4.1 起振过程

锁模光纤激光器中脉冲的形成过程是人们的研究热点之一, 目前已有大量学者对孤子^[72-73]、孤子分子^[84-85]、多脉冲^[86-87]的起振过程进行了详细的研究。增加泵浦功率时容易在锁模激光器中获得多脉冲, 然而大部分研究中这些脉冲通常具有相同的群速度以及时间间隔。单腔双光梳锁模光纤激光器作为一种新型的激光器, 能够在同一个腔中形成两个具有一定重频差的稳定锁模脉冲。异步脉冲在腔内表现出不同的时域及光谱特性, 并具有不同的演化行为, 由此可能导致它们具有不同的起振过程。因此, 研究异步脉冲的起振过程不仅能够深入理解其锁模过程中的物理机理, 还可能对激光器的设计提供指导意义。2020 年, 本课题组^[88]首次报道了偏振复用单腔双光梳锁模光纤激光器中异步矢量孤子的起振过程。首先, 实验搭建偏振复用双光梳锁模光纤激光器用于产生两个具有不同重复频率的正交偏振锁模脉冲, 并搭建 TS-DFT 系统进行孤子光谱的实时测量, 如图 7(a) 所

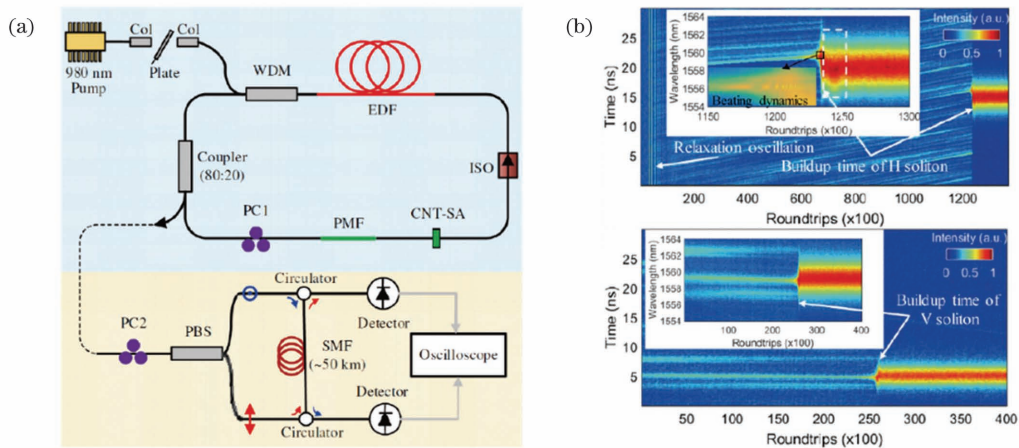


图 7 偏振复用锁模光纤激光器中异步矢量孤子的起振过程^[88]。(a) 激光器及单光谱测量示意图; (b) 水平偏振和垂直偏振矢量孤子的起振过程

Fig. 7 Buildup dynamics of asynchronous vector solitons in a polarization-multiplexed mode-locked fiber laser^[88]. (a) Schematic of the laser and the single-shot spectral measurement; (b) buildup dynamics of horizontally and vertically polarized vector solitons

示。实验发现,矢量孤子的起振过程大致分为以下几个过程:弛豫振荡、准连续锁模、光谱拍频、稳定锁模前的过渡状态以及稳定锁模,如图 7(b)所示。在稳定锁模前脉冲光谱迅速展宽的过程中,两个矢量孤子的中心波长向相反的方向移动,这可能是由腔内增益饱和引起的。此外,实验发现两个矢量孤子的起振时间不同,通过仿真研究猜测这是由掺铒光纤的偏振相关增益引起,并且发现两个偏振分量的脉冲的起振时间差具有一定的随机性。

双向锁模光纤激光器中孤子的起振过程同样被进行了研究。2020 年,英国阿斯顿大学的 Kudelin 等^[89]搭建了基于 NPR 锁模的双向光纤激光器并利用 TS-DFT 技术对双向孤子光谱进行测量,发现顺时针和逆时针传输的脉冲经历调制不稳定性引起的光谱拍频后会分裂,分裂的脉冲相互远离并最终形成稳定的单脉冲锁模。Kudelin 等^[90]还发现双向脉冲在稳定锁模前有可能经历较长时间的调 Q 锁模过程,并分裂形成多孤子结构,且孤子碰撞会引起色散波辐射。

4.2 碰撞过程

单腔双光梳锁模光纤激光器中两个脉冲在腔内传输的群速度有所不同,导致其相互之间不可避免地发生周期性的碰撞。碰撞过程中短距离孤子间强烈的非线性相互作用导致其瞬态光谱偏离稳定状态并形成丰富的非线性现象,因此研究孤子碰撞的实时演化过程对加深孤子-孤子相互作用有重要意义。2018 年,香港大学的 Wong 等^[92]搭建了双波长掺铒锁模光纤激光器,获得重频差约为 550 Hz 的异步脉冲,并首次对双色锁模光纤激光器中的孤子碰撞过

程进行了详细的研究。研究发现碰撞过程中孤子光谱的中心波长发生移动,并且孤子 Kelly 旁瓣经历重新建立的过程。碰撞后随着两脉冲的逐渐远离,孤子光谱和 Kelly 旁瓣逐渐恢复至原先状态。

本课题组^[91]在 2021 年首次对偏振复用双光梳锁模光纤激光器中正交偏振的异步锁模脉冲的碰撞过程进行了详细的研究。实验发现在碰撞前,两孤子光谱上存在致密的干涉条纹,如图 8(a)所示,这说明在其各自偏振分量上可能分别存在其他脉冲,并通过仿真研究证明光纤中正交偏振分量的交叉偏振耦合会导致该弱脉冲的形成。碰撞时,在交叉相位调制的作用下两个矢量孤子的中心波长向相反的方向移动。随后,光谱干涉条纹迅速向蓝端移动并逐渐减缓速度,这表明相同偏振分量下主脉冲与弱脉冲的相位差随着圈数演化单调改变并逐渐趋于极值。碰撞后,随着两个矢量孤子的逐渐远离,光谱干涉条纹变得越来越密。而且,两个矢量孤子间的分离速度前期慢于碰撞前,经历加速过程后逐渐恢复至碰撞前的速度,激光器逐渐恢复到碰撞前的初始稳定状态。

另外,实验发现在特殊的参数条件下,矢量孤子碰撞可以产生强烈的碰撞效果,在光谱上产生尖锐的孤子边带,如图 8(b)所示。近似周期性强度不等的边带仅出现在垂直偏振矢量孤子上,通过仿真研究发现该边带为正交偏振分量的相干耦合引起的四波混频(FWM)边带。该现象将 FWM 边带的形成环境从弱双折射锁模光纤激光器稳定运转的矢量孤子拓展到激光器内矢量孤子的相互碰撞,这对 FWM 边带形成的非线性动力学起到了补充作用。

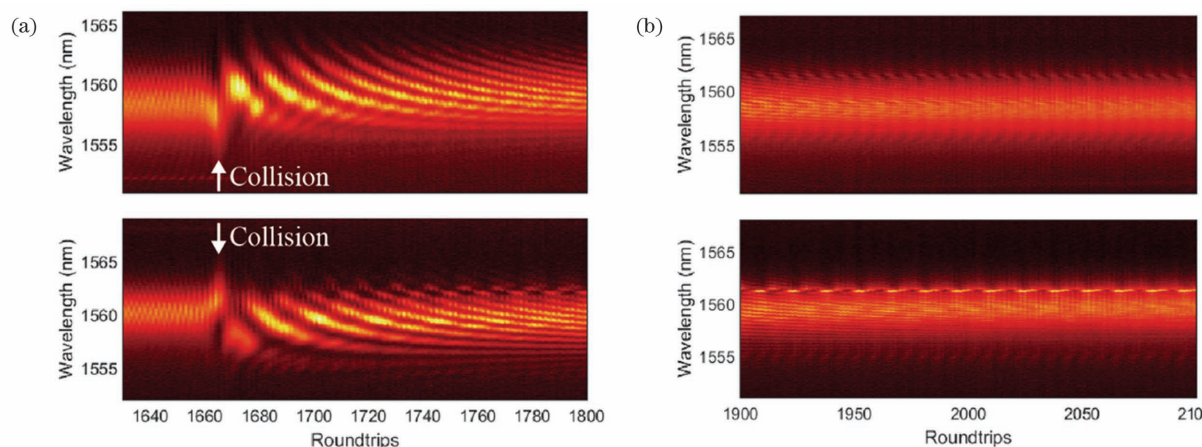


图 8 偏振复用锁模光纤激光器中异步矢量孤子的碰撞过程^[91]。(a)温和碰撞;(b)强烈碰撞

Fig. 8 Collision dynamics of asynchronous vector solitons in a polarization-multiplexed mode-locked fiber laser^[91].

(a) Moderate collision; (b) extreme collision

5 单腔双光梳锁模光纤激光器应用

5.1 吸收谱测量

2016 年,美国亚利桑那大学的 Kieu 等^[18]利用双向复用双光梳对 HCN 气体吸收谱进行测量,光频域分辨率可达 1 GHz。该紧凑、全光纤化的双光梳光谱测量系统不需要复杂的光学相位锁定手段,在实验室外应用具有巨大的发展前景。北京航空航天大学的 Zheng 等^[19]利用双波长锁模双光梳对半径为 100 μm 的氮化硅微环谐振腔透射谱进行 1990 次平均测量,测得的透射谱最窄共振峰的半峰全宽为 1.5 pm,与扫描激光法测得的 1.2 pm 的谱宽较为吻合。该 pm 量级分辨率的双光梳光谱系统表明,单腔双光梳光谱技术同样有能力应用于高精度光谱计量领域。Zheng 等^[93]还通过孤子自频移的方式将双波长双光梳光谱扩展到约 1.65 μm ,对甲烷吸收谱线进行测量。除此之外,波兰弗罗茨瓦夫理工大学的 Sotor 等^[64]通过计算相位恢复和修正算法辅助偏振复用双光梳对 HCN 气体吸收谱线进行测量,在 200 ms 测量时间、超过 1 THz 光谱范围的光谱测量精度优于 1%。除了 1.5 μm 波段,人们同样对约 2 μm 波段的水蒸气吸收谱进行了系统的测量研究^[37,50,56]。

5.2 测距

飞行时间法是光频梳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

间间隔计算出待测目标的绝对距离,但是受限与光电探测器响应速度,距离分辨率仅能达到毫米量级^[94]。采用双光梳进行距离测量能够将超短光脉冲下转换至较宽的时间展宽脉冲,极大地降低了系统对光电探测器高带宽的需求。2017 年,中国计量科学研究所的 Fang 等^[95]与北京航空航天大学的 Zheng 合作,利用重频差约为 1 kHz 的双波长单腔双光梳在 80 m 长的标准导轨上进行距离测量。对时域干涉图样进行傅里叶变换得到光谱相位信息,由参考臂与测量臂的相位差计算出待测距离,实现 70 m 距离、1 s 的测量时间内的标准差优于 10 μm 。

5.3 光纤传感

FBG 作为一种超灵敏光学传感器,具有体积小、质量小、抗电磁干扰、复用能力强等优点,广泛应用于应力、温度、振动等物理量测量中^[96-98]。双光梳具有优秀的光谱测量能力,可对 FBG 反射谱进行解调。2013 年,日本东京大学的 Kuse 等^[99]采用两台相互锁定的锁模光纤激光器产生了高相干性双光梳,并对施加在 FBG 上的静态应力进行测量,应力分辨率可达 34 n ϵ ,但是系统结构过于复杂。因此,2018 年本课题组^[55]采用双向锁模掺铒光纤激光器产生重频差约 9 Hz 的双光梳光源,并对 5 个级联 FBG 的反射谱同时测量,如图 9(a)所示。该自由运转状态下的双光梳具有良好的长程稳定性,1 h 内重复频率最大漂移量达 13 Hz,重频差的标准差仅为 0.06 Hz。其中一个 FBG 作为参考用于消除外界

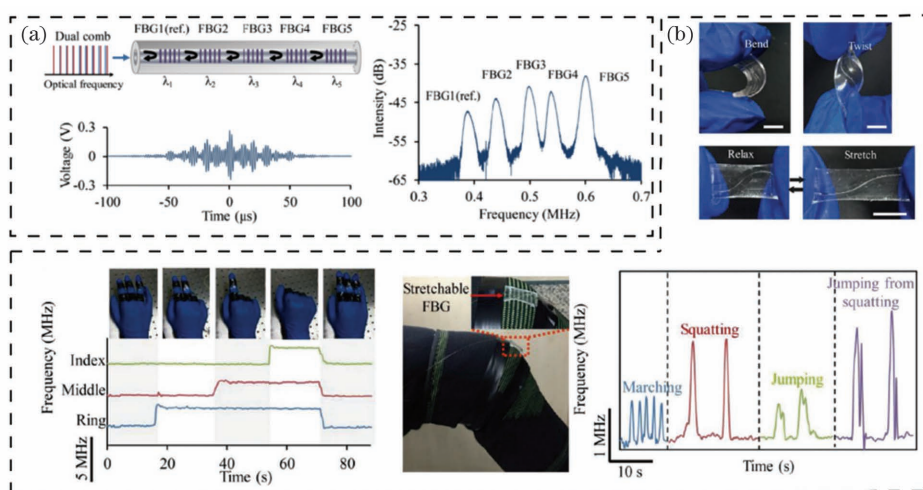


图 9 单腔双光梳的应用。(a)方向复用单腔双光梳用于光纤光栅静态应力应变测量^[55]; (b)偏振复用单腔双光梳用于柔性可穿戴光纤传感测量^[100]

Fig. 9 Application of dual combs from a laser cavity. (a) Measurement of static strain sensing of FBG by bidirectionally multiplexed dual combs from a laser cavity^[55]; (b) measurement of wearable and skin-mountable strain sensing by polarization-multiplexed dual combs from a laser cavity^[100]

环境的影响,其余 4 个可对不同位置处的应力同时探测。最终测量结果表明该系统可实现 $520 \mu\text{e}$ 量程、 $0.5 \mu\text{e}$ 分辨率的静态应力测量。

此外,本课题组^[100]还将单腔双光梳应用于柔性可穿戴领域。将弯曲的 FBG 嵌入柔性有机聚合物模具中来提升光纤传感器形变量程,可实现多种应力应变动态测量,比如拉伸、弯曲、扭转等。形变量可由初始的 $<1\%$ 提升至 50% 。该柔性光纤传感器可与人体皮肤较好地贴合,可应用于人体多关节运动监测。实验中使用偏振复用单腔双光梳对该柔性传感器进行解复用,实现了手指手势识别、膝盖运动判断等,如图 9(b) 所示,在人体运动监测方面具有较大应用潜力。

5.4 其他

除了在吸收谱测量、测距、光纤传感领域的应用,单腔双光梳同样可应用于其他领域。2020 年,美国亚利桑那大学的 Kieu 等^[101]将双向掺铒锁模光纤激光器应用于相干反斯托克斯拉曼散射领域。紧凑的双向腔产生重频约 114 MHz 、重频差从 $12 \sim 41 \text{ Hz}$ 可调的双光梳,其中一路经过扩谱和放大后作为泵浦光束,另外一路作为斯托克斯光束,二者合束后打到样品上激发反斯托克斯信号。通过对两路光束引入等量线性啁啾,采用光谱聚焦的方法提高激发效率,对时域干涉信号傅里叶变换可获得样品的分子指纹信息。双光束可实现泵浦光束与斯托克斯光束的自动扫描,从而极大地提高了信号的激发速率。同年,德国莱布尼兹光子技术研究所的 Chernysheva 等^[102]利用双向环形腔中的 Sagnac 效应,采用三种不同的方式对不同旋转角速度下双向锁模光纤激光器输出脉冲重频差的变化进行测量,使得旋转检测灵敏性和分辨率有多个数量级的提升。此外,北京航空航天大学的 Zheng 等^[103]将近红外双光梳拓展至太赫兹波段,并通过自适应采样方法对低压氰化甲烷/空气混合气体进行吸收谱线测量,可实现 MHz 量级的光谱分辨率。

6 结束语

总结了双光梳的 4 种产生方法,并重点介绍了方向复用、波长复用、偏振复用和腔空间复用锁模光纤激光器产生双光梳的研究进展、腔内孤子起振和碰撞动力学过程以及激光器在吸收谱测量、测距和光纤传感等领域的应用。

虽然单腔双光梳锁模激光器具有结构简单、成本低廉等优势,但是其发展时间较短,仍旧存在重频

差较小且不易灵活调节、功率低等缺点,不利于工程应用中的高速测量和多场景切换。因此,如何实现重频差的灵活调节和高功率是未来单腔双光梳的研究方向之一。针对现有的单模锁模光纤激光器双光梳的不足,利用多模光纤锁模激光器实现高能量和大频差的光纤双光梳及多光梳是可能的研究趋势之一。^[104-109]

单腔双光梳存在的另外一个缺点是锁模光纤激光器自启较为困难,需要人为调节激光器状态,且每次锁模状态并非完全相同。近年来,人们开发出基于演化算法^[110]、遗传算法^[111-112]、类人算法^[113-114]等多种智能锁模技术,利用时域、光谱等信息判断脉冲状态,并调节电控偏振控制器使腔内锁模状态至目标状态。文献^[113]报道已实现 NPR 掺铒锁模光纤激光器 0.22 s 开机自动锁模和 14.8 ms 失锁恢复,解决了激光器难以自动锁模及失锁难以自动恢复的难题。因此,可将以上智能锁模技术应用于单腔双光梳锁模光纤激光器,通过开发异步脉冲锁模状态判断算法,提升了单腔双光梳激光器的自启和锁模状态一致的能力。

大量的分子指纹分布于中红外区域,而目前的报道中,单腔双光梳的工作波段主要集中在 $1, 1.5, 2 \mu\text{m}$ 波段,可通过超连续谱或者差频的方式将工作波段扩展至中红外波段,还可以利用特种增益光纤(如掺铒的氟化物光纤可受激辐射 $2.8 \mu\text{m}$ ^[115] 和 $3.5 \mu\text{m}$ ^[116] 激光)搭建中红外锁模光纤激光器,直接产生中红外双光梳^[117]。

此外,拓展单腔双光梳的应用领域是另外一个可能的研究方向。生物细胞研究作为生物医学中的重要研究内容对研究细胞的结构和功能至关重要,光镊^[118]作为一种利用光场梯度力和散射力抓捕纳米至微米量级粒子的工具,可以对生物细胞进行精细操纵。利用光镊技术捕获细胞并获取其拉曼光谱特征信息是光镊拉曼光谱技术^[119]的基本原理,但由于生物细胞的拉曼信号过于微弱导致数据采集较慢,且高强度激光对细胞产生损伤,该技术在活体细胞成像与生长监控方面的应用受限。将双光梳光谱技术与光镊技术相结合,不仅能对细胞进行力学特性研究,还能快速获取细胞的振动吸收光谱,有效降低了激光对细胞的影响,这对推动光镊和双光梳光谱技术在生物医学方面的发展具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Hänsch T W. Nobel lecture: passion for precision

- [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1297.
- [2] Nakamura T, Ito I, Kobayashi Y. Offset-free broadband Yb : fiber optical frequency comb for optical clocks [J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 19376-19381.
- [3] Riehle F. Optical clock networks [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(1): 25-31.
- [4] Cundiff S T, Ye J. Colloquium: femtosecond optical frequency combs [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2003, 75(1): 325.
- [5] Picqué N, Hänsch T W. Frequency comb spectroscopy [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(3): 146-157.
- [6] 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.
- [7] Murphy M T, Udem T, Holzwarth R, et al. High-precision wavelength calibration of astronomical spectrographs with laser frequency combs [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2007, 380(2): 839-847.
- [8] Coddington I, Newbury N, Swann W. Dual-comb spectroscopy [J]. *Optica*, 2016, 3(4): 414-426.
- [9] Schiller S. Spectrometry with frequency combs [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(9): 766-768.
- [10] Keilmann F, Gohle C, Holzwarth R. Time-domain mid-infrared frequency-comb spectrometer [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(13): 1542-1544.
- [11] 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.
- [12] Lomsadze B, Cundiff S T. Frequency combs enable rapid and high-resolution multidimensional coherent spectroscopy [J]. *Science*, 2017, 357(6358): 1389-1391.
- [13] Lomsadze B, Smith B C, Cundiff S T. Tri-comb spectroscopy [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(11): 676-680.
- [14] Ideguchi T, Holzner S, Bernhardt B, et al. Coherent Raman spectro-imaging with laser frequency combs [J]. *Nature*, 2013, 502(7471): 355-358.
- [15] Coddington I, Swann W C, Newbury N R. Coherent multiheterodyne spectroscopy using stabilized optical frequency combs [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(1): 013902.
- [16] Millot G, Pitois S, Yan M, et al. Frequency-agile dual-comb spectroscopy [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(1): 27-30.
- [17] Suh M G, Yang Q F, Yang K Y, et al. Microresonator soliton dual-comb spectroscopy [J]. *Science*, 2016, 354(6312): 600-603.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, et al. Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis [J]. *Science*, 2000, 288(5466): 635-639.
- [22] Swann W C, Baumann E, Giorgetta F R, et al. Microwave generation with low residual phase noise from a femtosecond fiber laser with an intracavity EOM [C] // *CLEO: Science and Innovations 2011*, May 1-6, 2011, Baltimore, Maryland, United States. Washington, D.C.: OSA, 2011: CFC7.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Gebs R, Klatt G, Janke C, et al. High-speed asynchronous optical sampling with sub-50 fs time resolution [J]. *Optics Express*, 2010, 18(6): 5974-5983.
- [26] Muraviev A V, Smolski V O, Loparo Z E, 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.
- [27] Coddington I, Swann W, Newbury N. Coherent dual-comb spectroscopy at high signal-to-noise ratio [J]. *Physical Review A*, 2010, 82(4): 043817.
- [28] Ideguchi T, Poisson A, Guelachvili G, et al. Adaptive real-time dual-comb spectroscopy [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3375.
- [29] 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.
- [30] Yang Q F, Yi X, Yang K Y, et al. Counter-propagating solitons in microresonators [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(9): 560-564.
- [31] Lucas E, Lihachev G, Bouchand R, et al. Spatial multiplexing of soliton microcombs [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(11): 699-705.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] Buholz N, Chodorow M. Acoustic wave amplitude modulation of a multimode ring laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1967, 3(6): 235.
- [35] Fork R L, Greene B I, Shank C V. Generation of optical pulses shorter than 0.1 psec by colliding pulse mode-locking [C]// *Conference on Lasers and Electro-Optics 1981*, June 10-12, 1981, Washington, D. C. United States. Washington, D. C.: OSA, 1981: WL1.
- [36] Kieu K, Mansuripur M. All-fiber bidirectional passively mode-locked ring laser [J]. *Optics Letters*, 2007, 33(1): 64-66.
- [37] 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.
- [38] Nakajima Y, Hata Y Y, Minoshima K. High-coherence ultra-broadband bidirectional dual-comb fiber laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 5931-5944.
- [39] Li B W, Xing J, Kwon D, et al. Bidirectional mode-locked all-normal dispersion fiber laser [J]. *Optica*, 2020, 7(8): 961-964.
- [40] Saito S, Yamanaka M, Sakakibara Y, et al. All-polarization-maintaining Er-doped dual comb fiber laser using single-wall carbon nanotubes [J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 17868-17875.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] Huang S S, Wang Y G, Yan P G, et al. Tunable and switchable multi-wavelength dissipative soliton generation in a graphene oxide mode-locked Yb-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 11417-11426.
- [44] Özgören K, Ilday F Ö. All-fiber all-normal dispersion laser with a fiber-based Lyot filter [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1296-1298.
- [45] Wang P, Zhao K J, Xiao X S, et al. Pulse dynamics of dual-wavelength dissipative soliton resonances and domain wall solitons in a Tm fiber laser with fiber-based Lyot filter [J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 30708-30719.
- [46] Liu Y, Zhao X, Liu J S, et al. Widely-pulsewidth-tunable ultrashort pulse generation from a birefringent carbon nanotube mode-locked fiber laser [J]. *Optics Express*, 2014, 22(17): 21012-21017.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] Fellingner 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.
- [53] Fellingner 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.
- [54] Pawliszewska M, Dużyńska A, Zdrojek M, et al. Wavelength- and dispersion-tunable ultrafast holmium-doped fiber laser with dual-color operation: publisher's note [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(5): 956-959.
- [55] 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.
- [56] Kayes M I, Abdukerim N, Rezik A, et al. Free-running mode-locked laser based dual-comb spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(23): 5809-5812.
- [57] Wang Z K, Wang D N, Yang F, et al. Er-doped mode-locked fiber laser with a hybrid structure of a step-index-graded-index multimode fiber as the saturable absorber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(24): 5280-5285.
- [58] Wang Z, Wang D N, Yang F, et al. Stretched graded-index multimode optical fiber as a saturable absorber for erbium-doped fiber laser mode locking [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 2078-2081.
- [59] Zhao K J, Jia H X, Wang P, et al. Free-running dual-comb fiber laser mode-locked by nonlinear multimode interference[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(17): 4323-4326.
- [60] Christodoulides D N, Joseph R I. Vector solitons in birefringent nonlinear dispersive media [J]. *Optics Letters*, 1988, 13(1): 53-55.
- [61] Cundiff S T, Collings B C, Akhmediev N N, et al. Observation of polarization-locked vector solitons in an optical fiber[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82(20): 3988.
- [62] Tang D Y, Zhang H, Zhao L M, et al. Observation of high-order polarization-locked vector solitons in a fiber laser[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(15): 153904.
- [63] 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.
- [64] 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.
- [65] 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.
- [66] Deng Z J, 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.
- [67] Uyama K, Shirahata T, Jin L, et al. All-PM dual-comb fiber ring laser using CNT-SA [C] // CLEO: Science and Innovations 2020, May 10-15, 2020, Washington, DC. Washington, D. C. : OSA, 2020: SW4R.2.
- [68] Zhao K J, Li Y, Xiao X S, et al. Nonlinear multimode interference-based dual-color mode-locked fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1655-1658.
- [69] Yang R T, Sun H, Lü 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.
- [70] Herink G, Kurtz F, Jalali B, et al. Real-time spectral interferometry probes the internal dynamics of femtosecond soliton molecules[J]. *Science*, 2017, 356(6333): 50-54.
- [71] Krupa K, Nithyanandan K, Andral U, et al. Real-time observation of internal motion within ultrafast dissipative optical soliton molecules [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(24): 243901.
- [72] Herink G, Jalali B, Ropers C, et al. Resolving the build-up of femtosecond mode-locking with single-shot spectroscopy at 90 MHz frame rate[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(5): 321-326.
- [73] Liu X M, Cui Y D. Revealing the behavior of soliton buildup in a mode-locked laser [J]. *Advanced Photonics*, 2019, 1(1): 016003.
- [74] Liu X M, Pang M. Revealing the buildup dynamics of harmonic mode-locking states in ultrafast lasers [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(9): 1800333.
- [75] Runge A F J, Broderick N G R, Erkintalo M. Observation of soliton explosions in a passively mode-locked fiber laser[J]. *Optica*, 2015, 2(1): 36-39.
- [76] Peng J S, Zeng H P. Soliton collision induced explosions in a mode-locked fibre laser [J]. *Communications Physics*, 2019, 2: 34.
- [77] Liu M, Luo A P, Yan Y R, et al. Successive soliton explosions in an ultrafast fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(6): 1181-1184.
- [78] Wang P, Xiao X S, Zhao H, et al. Observation of duration-tunable soliton explosion in passively mode-locked fiber laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(6): 1-8.
- [79] Soto-Crespo J M, Akhmediev N, Ankiewicz A. Pulsating, creeping, and erupting solitons in dissipative systems [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(14): 2937.
- [80] Du Y Q, Xu Z W, Shu X W. Spatio-spectral dynamics of the pulsating dissipative solitons in a normal-dispersion fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(15): 3602-3605.
- [81] Peng J, Boscolo S, Zhao Z, et al. Breathing

- dissipative solitons in mode-locked fiber lasers [J]. *Science Advances*, 2019, 5(11): eaax1110.
- [82] Chen H J, Tan Y J, Long J G, et al. Dynamical diversity of pulsating solitons in a fiber laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 28507-28522.
- [83] Liu M, Wei Z W, Li H, et al. Visualizing the “invisible” soliton pulsation in an ultrafast laser [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(4): 1900317.
- [84] Liu X M, Yao X K, Cui Y D. Real-time observation of the buildup of soliton molecules [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(2): 023905.
- [85] Peng J S, Zeng H P. Build-up of dissipative optical soliton molecules via diverse soliton interactions [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(8): 1800009.
- [86] Wang G M, Chen G W, Li W L, et al. Real-time evolution dynamics of double-pulse mode-locking [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(4): 1-4.
- [87] Yu Y, Li B W, Wei X M, et al. Spectral-temporal dynamics of multipulse mode-locking [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(20): 201107.
- [88] 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.
- [89] Kudelin I, Sugavanam S, Chernysheva M. Build-up dynamics in bidirectional soliton fiber lasers [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(6): 776-780.
- [90] Kudelin I, Sugavanam S, Chernysheva M. Pulse-onset dynamics in a bidirectional mode-locked fibre laser via instabilities [J]. *Communications Physics*, 2020, 3: 202.
- [91] 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.
- [92] 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.
- [93] 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.
- [94] Kilpelä A, Pennala R, Kostamovaara J. Precise pulsed time-of-flight laser range finder for industrial distance measurements [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(4): 2197-2202.
- [95] 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): 1-8.
- [96] Wang Y M, Gong J M, Wang D Y, et al. A quasi-distributed sensing network with time-division-multiplexed fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(2): 70-72.
- [97] Jin L, Zhang W G, Zhang H, et al. An embedded FBG sensor for simultaneous measurement of stress and temperature [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(1): 154-156.
- [98] Guo J J, Xue S G, Zhao Q, et al. Ultrasonic imaging of seismic physical models using a phase-shifted fiber Bragg grating [J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19573-19580.
- [99] 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.
- [100] 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.
- [101] Qin Y K, Cromey B, Batjargal O, et al. All-fiber single-cavity dual-comb for coherent anti-Stokes Raman scattering spectroscopy based on spectral focusing [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(1): 146-149.
- [102] Chernysheva M, Sugavanam S, Turitsyn S. Real-time observation of the optical Sagnac effect in ultrafast bidirectional fibre lasers [J]. *APL Photonics*, 2020, 5(1): 016104.
- [103] 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.
- [104] Wright L G, Christodoulides D N, Wise F W. Spatiotemporal mode-locking in multimode fiber lasers [J]. *Science*, 2017, 358(6359): 94-97.
- [105] Wright L G, Sidorenko P, Pourbeyram H, et al. Mechanisms of spatiotemporal mode-locking [J]. *Nature Physics*, 2020, 16(5): 565-570.
- [106] Qin H Q, Xiao X S, Wang P, et al. Observation of soliton molecules in a spatiotemporal mode-locked multimode fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 1982-1985.
- [107] Ding Y H, Xiao X S, Wang P, et al. Multiple-soliton in spatiotemporal mode-locked multimode fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 11435-11446.
- [108] Teğın U, Kakkava E, Rahmani B, et al. Spatiotemporal self-similar fiber laser [J]. *Optica*,

- 2019, 6(11): 1412-1415.
- [109] Ding Y H, Xiao X S, Liu K W, et al. Spatiotemporal mode-locking in lasers with large modal dispersion [J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(9): 093901.
- [110] Andral U, Fodil R S, Amrani F, et al. Fiber laser mode locked through an evolutionary algorithm[J]. *Optica*, 2015, 2(4): 275-278.
- [111] Woodward R I, Kelleher E J. Towards 'smart lasers': self-optimisation of an ultrafast pulse source using a genetic algorithm [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 37616.
- [112] Woodward R I, Kelleher E J R. Genetic algorithm-based control of birefringent filtering for self-tuning, self-pulsing fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(15): 2952-2955.
- [113] Pu G Q, Yi L L, Zhang L, et al. Intelligent programmable mode-locked fiber laser with a human-like algorithm[J]. *Optica*, 2019, 6(3): 362-369.
- [114] Pu G, Yi L, Zhang L, et al. Intelligent control of mode-locked femtosecond pulses by time-stretch-assisted real-time spectral analysis [J]. *Light, Science & Applications*, 2020, 9: 13.
- [115] Zhu X S, Jain R. 10-W-level diode-pumped compact 2.78 μm ZBLAN fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2006, 32(1): 26-28.
- [116] Többen H. Room temperature cw fibre laser at 3.5 μm in Er^{3+} -doped ZBLAN glass [J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(14): 1361-1362.
- [117] Liao R Y, Tian H C, Liu W, et al. Dual-comb generation from a single laser source: principles and spectroscopic applications towards mid-IR: a review [J]. *Journal of Physics: Photonics*, 2020, 2(4): 042006.
- [118] Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E, et al. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles [J]. *Optics Letters*, 1986, 11(5): 288-290.
- [119] Xie C G, Dinno M A, Li Y Q. Near-infrared Raman spectroscopy of single optically trapped biological cells [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(4): 249-251.

Recent Progress of Single-Cavity Dual-Comb Mode-Locked Fiber Lasers and Their Applications

Yang Changxi^{1*}, Zhao Kangjun¹, Cao Bo¹, Gao Chenxin¹, Xiao Xiaosheng²

¹ State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

² State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract

Significance Optical frequency combs (OFCs) with ultrahigh stability have revolutionized metrology science and facilitated a series of new research disciplines and directions, such as optical clock, precision spectroscopy, absolute distance measurement, and astrophysics. Recently, dual-comb spectroscopy (DCS), as an emerging broadband spectroscopic technique, has attracted substantial attention owing to its outstanding advantages of ultrahigh-frequency resolution, accuracy, and sampling rate. DCS has significant applications in various areas, such as gas absorption spectroscopy, greenhouse gas monitoring, and nonlinear spectral imaging. To achieve DCS, two coherent OFCs with a small offset of comb spacing are demanded. Various approaches could be used to generate these two OFCs, including phase-locking two independent mode-locked lasers, modulating a continuous-wave (CW) laser using two electro-optic modulators, or by directionally pumping a microresonator using a CW laser (Fig. 3). However, those dual-comb systems generally require high-cost and bulky electronic configurations, a limited number of comb lines, or sophisticated fabrication processes, which pose substantial challenges for their practical applications. Dual-comb lasing in a single fiber laser (known as single-cavity dual-comb mode-locked fiber laser) is a viable alternative for releasing DCS, owing to mode-locking of direction/wavelength/polarization/cavity multiplexing. Because both combs are created from a single cavity, a compact and low-complexity DCS is possible owing to intrinsic high phase coherence and the absence of complex servo locking systems. This article reviews the recent research progress of single-cavity dual combs, ranging from their generation approaches, soliton dynamics to applications.

Progress Four types of multiplexing methods to generate dual combs from a single cavity-directions (Fig. 4), wavelengths (Fig. 5), polarization (Fig. 6), and cavity spaces are first summarized. Generally, the spectra of wavelength multiplexing dual combs do not overlap, leading to the necessary implementations of amplification and spectral broadening for practical applications, which increases the complexity of the entire system. Polarization multiplexing and bidirectional mode-locking create dual combs with overlapped spectra, but their tunable range is a limitation. Although noncommon optical-path structures could flexibly tune the offset repetition rate in a larger range, most spatially optical delay lines cause the system to be complicated. Therefore, novel single-cavity dual-comb lasers with all fiber and flexible tunability of the offset repetition rate are vigorously explored to overcome those pitfalls.

Mode locking is a complicated process that locks a huge number of longitudinal modes with the same phase difference to form ultrashort pulses. Single-cavity dual-comb mode-locked lasers could produce two stable pulses with slightly varying repetition rates. These novel asynchronous have a range of spectral and temporal features as well as differing intracavity evolution tendencies. This distinctive behavior distributes different net gains on both pulses leading to their distinguishable buildup dynamics. The entire buildup processes of asynchronous vector solitons in a polarization-multiplexed dual-comb fiber laser include relaxation oscillation, quasi-mode locking, spectral beating dynamics, and stable mode-locking (Fig. 7). Polarization hole burning in the erbium-doped fiber might facilitate the different buildup periods of both vector solitons. Besides, counter-propagating pulses in a bidirectional ultrafast fiber laser undergo splitting after beating dynamics caused by modulation instability and finally annihilate to a stable bidirectional pulse. Buildup dynamics of counter-propagating ultrashort pulses might also undergo a long-time Q -switched mode-locking, accompanied by the formation of multisoliton structures.

Various group-velocities of both pulses cause the inevitable soliton collisions in dual-comb fiber lasers. Strong soliton-soliton interactions during collisions lead to their fascinating transient spectral evolutions and rich nonlinear phenomena. We summarize the collision processes of asynchronous scalar and vector solitons in dual-wavelength and polarization-multiplexed mode-locked fiber lasers, respectively. Scalar solitons experience the collision-induced self-reshaping process, such as the central wavelength shifts, dynamic spectral fringes, and rebuilding process of the Kelly sidebands. Vector-soliton collisions, however, could yield substantial four-wave mixing sidebands owing to cross-polarization coupling and the formation of another subordinate pulse on each polarization component (Fig. 8).

Intrinsic mutual phase coherence of single-cavity dual combs ensures the simple configuration for practical applications. Both frequency combs' heterodyne beats map the molecular fingerprint from optical domain to radio frequency domain, which could be reconstructed using the Fourier transform of the time-domain interferogram obtained by a photodetector. Thus, DCSs by free-running dual-comb mode-locked fiber lasers have been leveraged to measure the gas absorption spectrum of hydrogen cyanide, water vapor, and methane, the coherent anti-stokes Raman scattering spectroscopy, and especially the optical sensing with fiber Bragg gratings (Fig. 9), as well as the application domains in absolute distance measurement and fiber optic gyroscopes.

Conclusions and Prospects Single-cavity dual-comb mode-locked fiber lasers exhibit remarkable merits of simple configuration and low cost, presenting broadband applications in enormous disciplines. However, small repetition rates, weak tunability, difficult self-starting, limited operating wavebands, are some of its limitations. Thus, some works ought to be examined in the future.

Key words lasers; dual-comb spectroscopy; single-cavity dual combs; mode-locked fiber lasers

OCIS codes 140.4050; 140.7090; 190.4370; 300.6360