

单腔双光梳激光器及其光谱学应用研究进展

朱志高¹, 刘 娅^{1*}, 杨 洁¹, 胡国庆^{2,3}

1. 云南师范大学物理与电子信息学院, 云南省光电信息技术重点实验室, 云南 昆明 650500
2. 北京信息科技大学, 光电测试技术及仪器教育部重点实验室, 北京 100192
3. 北京信息科技大学, 光纤传感与系统北京实验室, 北京 100016

摘 要 光频梳因频率等间隔、波长稳定、谱线线宽窄以及谱宽大等特性, 在高精度测量和计量中具有广泛的应用。其中, 双光梳快速测量包括光谱测量、绝对测距、三维成像和超快异步光学采样等已成为研究热点之一。近年来, 基于自由运行的单腔双光梳激光器的双梳光谱学系统由于具有结构简单、测量范围大和精度高等优点而备受关注。首先从时域和频域介绍了光频梳的特性和应用, 尤其介绍了双光梳测量的优势, 相较于目前主流的稳频稳相锁模激光器、电光调制等双光梳光源实现方案, 单腔双光梳激光器方案有望避免采用复杂的电子控制系统, 简化双光梳光源的结构、体积和成本。因此, 重点介绍了波长复用、偏振复用、空间复用和脉冲波形复用的单腔双光梳光纤激光器实现技术, 并对其基本原理、性能参数和当前研究的进展以及目前发展中仍然存在的问题进行了分析; 同时对保偏光纤双光梳激光器的研究现状及其性能进行了总结。接着, 重点介绍了双梳光谱学的测量原理, 回顾了现有光谱扩展技术, 并详细介绍了基于自由运行的单腔双光梳激光器的双梳光谱学应用案例, 包括掺铒光纤激光器所在的近红外波段以及其扩展到中红外和太赫兹波段的光谱探测。最后, 总结了目前的单腔双光梳激光器的主要发展趋势, 包括进一步提高单腔型双光梳激光腔的重频稳定性、降低共模噪声、探索单腔双光梳系统在中红外以及太赫兹波段的应用, 推动单腔双光梳锁模光纤激光器的实用化。

关键词 光频梳; 双梳光谱学; 锁模激光器; 异步光学采样

中图分类号: TN248

文献标识码: R

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)11-3321-10

引 言

光学频率梳, 又称光频梳或光梳, 是由一系列等频率间隔的相干光波构成的一种新型宽带光源。光频梳频域为 MHz~GHz 量级等间隔的窄线宽频谱分量, 其时域为具有飞秒量级时间宽度的周期性脉冲序列, 用于光学测量时具有极高的光谱分辨率和时间分辨率, 已在精密光谱、时间和频率的计量以及时钟的同步和校准等方面开展了广泛应用^[1-2]。

利用光频梳作为光源进行测量, 需要对携带有待测信息的超短时域脉冲信号进行光电探测, 然后在时域或频域进行分析来获得待测信息, 如飞行时间法测距、傅里叶变换光谱(Fourier transform spectroscopy, FTS)等。由于飞秒脉冲信号的持续时间极短, 无法直接由光电探测器进行光电转换而获得, 因此通常利用自相关或互相关的相干检测方法间接

测量。在传统的相关测量系统中, 需要用到机械位移元件来获得不同延迟的相关信号, 因而限制了测量速度的进一步提高。为提高测量速率, 一种新型的双光梳测量技术应运而生, 即采用两套频率间隔精确锁定但略有差别的相干光频梳, 相应地其时域脉冲的重复频率具有微小的频差, 通过两脉冲之间固定的时间走离实现异步光学采样(asynchronous optical sampling, ASOPS)^[3,4], 其原理如图 1 所示。异步光学采样最初在 1987 年提出, 与基于机械延迟的同步光学采样相比具有两个优势: 一是不需要任何位移元件, 其测量更新频率等于两套脉冲的重复频率差, 具有非常高的测量速度, 可达 kHz 量级以上; 二是其等效采样步长大大减小, 可获得飞秒量级的测量精度。双光梳测量技术具有的快速测量和高精度的优势, 尤其适用于精密光谱学^[5-8]、绝对距离测量^[9-12]以及快速泵浦探测^[13]等, 同时在目标跟踪测距、太赫兹安检以及微环谐振器性能表征等需要快速响应的高精度测

收稿日期: 2020-10-21, 修订日期: 2021-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(61705236), 北京市自然科学基金项目(3204047)资助

作者简介: 朱志高, 1990 年生, 云南师范大学物理与电子信息学院硕士研究生 e-mail: zhuzg37@sina.com

* 通讯作者 e-mail: liuya@buaa.edu.cn

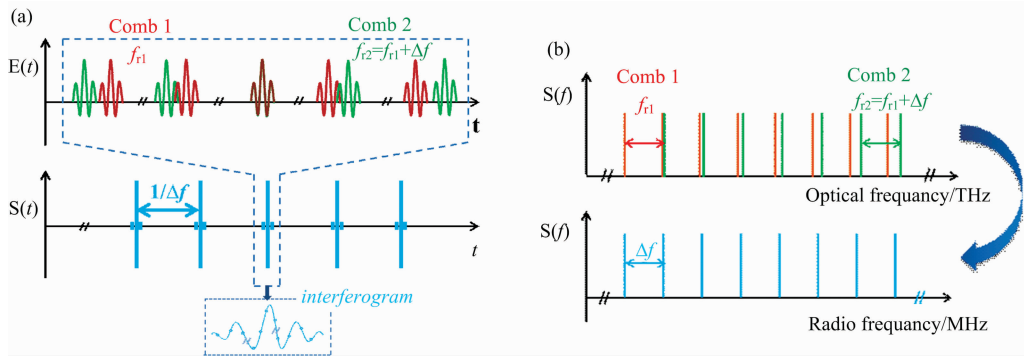


图 1 异步光学采样原理图

(a): 时域; (b): 频域

Fig. 1 Schematic diagram of asynchronous optical sampling

(a): Time domain; (b): Frequency domain

量领域具有重要实际应用价值。

目前产生光频梳甚至相干双光频梳的技术主要有三种: 锁模激光器^[14-18]、电光调制^[19-20]和非线性光学微谐振腔^[21-22]。其中, 基于锁模激光器的光频梳相比而言具有更宽的带宽和更小的谱线间隔, 更适用于精密光谱探测领域。目前, 采用两套飞秒锁模激光器, 并将它们的重复频率和包络载波相移频率严格锁定到原子钟等参考频率, 是较为成熟的双光梳生成技术。该技术能够在宽带范围内获得接近理想的光频梳, 其梳齿具有极窄的线宽和绝对的频率, 可以同时获得高分辨率、绝对的频率精度以及高信噪比。但是由于需要复杂的频率锁定电子反馈控制系统, 其复杂度和成本仍然较高, 因而难以将其在有体积、功耗等严格限制的诸多应用中进一步实用化。

近年来, 一种单腔锁模激光器的双光梳产生方式备受关注, 在同一个激光器中能够产生两套重复频率略有差异的飞秒脉冲。自由运行的单腔双光梳激光器因共腔而具有共模噪声抑制作用, 其生成的脉冲间的相对频率稳定性高, 因而无需对该激光腔进行频率锁定等主动控制, 显著降低了双光梳光源的复杂度和成本。其在双光梳光谱学、绝对测距、频率计量和泵浦探测等应用中都表现出良好的性能, 具有替代传统庞大而昂贵的频率锁定的双光频梳系统的潜力。

1 单腔双光频梳技术

通常由于受限于模式增益竞争并考虑实现锁模的较苛刻的带宽、能量要求, 传统锁模激光器只输出具有一个中心波长和一个重复频率的脉冲。然而光纤在导波机制上具有多个不同的物理维度, 支持光信号的复用传输, 如波长复用、偏振复用等, 这些机制目前在超大容量光通信等领域得到了高度重视并为突破信息传输容量的极限提供了途径。单腔双光梳技术就是利用光纤的相关导波物理维度上的资源, 利用脉冲在光纤不同维度上的传播特性差异, 使光纤锁模激光中生成异步的双重频脉冲序列成为可能。由于这种单腔双光梳的重复频率差由腔内的总色散或双折射大小决定, 使得单一激光光纤腔中产生的两套亚皮秒脉冲具有微小重复频率差, 并

且由于共模作用频差不易受到外界环境的干扰, 因而近年来备受关注。目前, 基于光纤激光腔复用产生双重序列的方式可主要归纳为波长复用、偏振复用和空间复用等。最近, 为了进一步提高稳定性, 利用保偏光纤来构成双梳激光器也得到了研究。

1.1 波长复用

在以往的研究中, 采用波长这一维度进行复用的多波长直流光激光器通常是利用腔内周期性窄带光谱滤波的方式来实现在多波长激光激射的。然而, 对于脉冲激光, 腔内的滤波效应对锁模激光的带宽限制和超短脉冲的生成之间可能存在严重的矛盾, 因此一直在传统的锁模光源中极少采用。另一方面, 虽然采用类似多波长直流光激光器结构可以产生带宽较窄的多波长信号^[23], 但其脉冲稳定性、重频特性及其原因并未得到研究, 带宽也不能满足双光梳光谱学应用的需要。因此, 一直以来, 多波长锁模是否能够稳定生成具有不同重频的超短脉冲的问题没有得到关注和充分研究。

2011年, 北京航空航天大学赵欣提出利用增益光纤的增益谱倾斜效应, 在激光腔内加入一个可调衰减器调控激光腔内的损耗, 实现了 1 532 和 1 557 nm 的双波长亚皮秒锁模^[24]。当腔内损耗较低时, 长波长单独锁模, 而当腔内损耗逐渐增大时, 掺铒光纤在短波长 1 532 nm 处的增益也逐渐增大并锁模, 最终实现了两个波长的同时锁模, 发现了锁模脉冲具有分别为 9.090 312 和 9.089 842 MHz 的不同重复频率, 并明确解释了该重频差是由光纤腔的群速度色散决定的。

此外, 在腔内加入光谱滤波器件, 也可以实现双波长甚至多波长运转。其中, Lyot 滤波器由于结构简单、光纤兼容性好、滤波深度和透过峰可调而被在波长复用的单腔双梳光源中得到了应用。其工作原理是基于偏振干涉效应, 可由腔内双折射和一个偏振相关元件构成, 其光谱透过率呈现出具有固定波长间隔和滤波深度可调的梳状。北京航空航天大学郑铮教授团队报道了基于 Lyot 滤波与腔内损耗控制效应相结合的双波长掺铒光纤飞秒锁模激光器^[25], 其结构和输出特性如图 2 所示。该激光器重复频率漂移大于 10 Hz 时, 10 min 内重频差标准差为 16 mHz, 表明其具有良好的

环境噪声抑制特性。2019 年,日本丰田工业大学的 Luo 等也采用 Lyot 滤波方式实现了掺铒光纤双波长双梳光源^[26]。2020 年,Zhu 等报道了一种基于动态可调 Lyot 滤波器,实现了双波长掺铒光纤锁模激光器,波长调谐范围为 30

nm^[27]。除此以外,还可以利用锥形光纤滤波^[28]、Sagnac 环滤波^[29]等实现波长复用锁模。基于波长复用的单腔双光梳锁模激光器输出的各波长相互错开,有效规避了增益竞争而具有较高的运行稳定性,其重频差可较准确地进行设计。

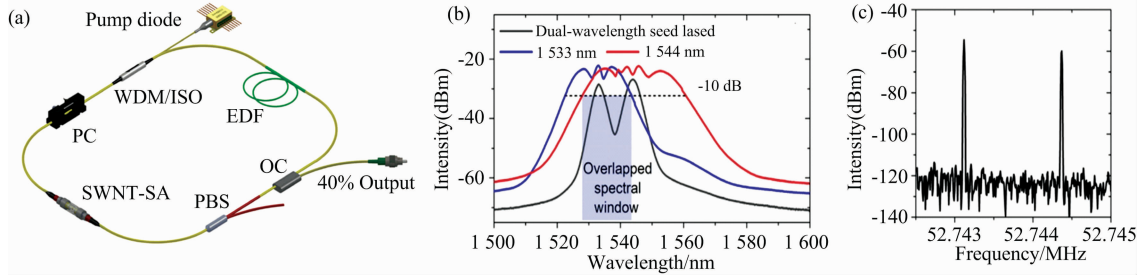


图 2 (a) 基于滤波及腔内损耗控制的双波长激光器结构图; (b) 光谱图; (c) 频谱图
 Fig. 2 (a) Structure diagram of dual-wavelength laser controlled by filter and attenuator effect; (b) optical spectrum; (c) RF spectrum

2018 年,天津大学宋有建团队与北航团队合作研究了单腔双波长锁模激光器的相对时间抖动(相位噪声)问题^[30]。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 $0.82 \text{ fs} \pm 25 \text{ as}$,与常见的单波长孤子锁模光源的指标相近,其结果表明单腔的共路结构能够消除环境引起的共模噪声。

1.2 偏振复用

偏振复用的单腔双梳光源利用光纤腔内的双折射,使得不同偏振方向的锁模脉冲存在群速度差异,从而实现两路脉冲的微小重频差。

2014 年,郑铮团队提出通过将一段保偏光纤(polarization-maintaining fiber, PMF)引入到非保偏碳纳米管激光器中实现了两个不同重复频率的正交偏振孤子脉冲序列输出^[31],其光谱之间具有良好的重叠,不需要对其进行非线性谱展宽便可直接应用于双光梳测量^[32]。通过对偏振复用激光器的偏振进行调节,实现了重频差的连续可调。2018 年,他们进而演示验证了对于反常色散和正常色散腔中的孤子和

耗散孤子均可以用该方法获得偏振复用的双梳生成^[33],而且生成脉冲可产生高质量的双梳光谱学信号,其结构和输出结果如图 3 所示。后续,2019 年 Łukasz A. Sterczewski 等用石墨烯作为可饱和吸收体,采用相同的光腔结构,实现了 140 MHz 的重复频率和几百赫兹到几千赫兹重复频率差可调的偏振复用激光器,该激光器可以在 350 mW 的较低功率下连续工作十几个小时,证明了此类腔型的稳定性^[34]。2019 年,日本电气通信大学的 Minoshima 研究团队也采用非线性放大环形镜(nonlinear amplifying loop mirror, NALM)锁模的方法实现了偏振复用的双光梳生成^[35]。此外,在固体激光器中,一般采用双光轴晶体,如 Nd:YAG, Yb:KGW, Nd:YLF^[36-39]等作为增益介质,也可以实现正交偏振的双重频脉冲输出,这类锁模激光器重复频率都能达到 GHz 量级,但是其应用往往受限于其锁模性能以及相对复杂的系统结构。

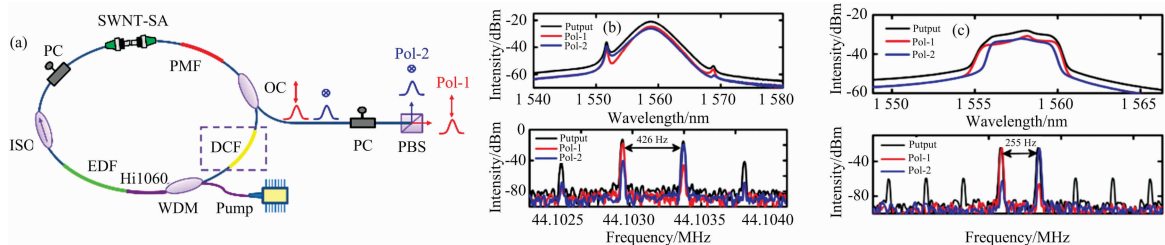


图 3 (a) 偏振复用双光梳锁模激光器; (b) 反常色散; (c) 正常色散: 偏振分解的光谱和频谱
 Fig. 3 (a) Schematic of the polarization-multiplexed dual-comb fiber laser; (b) abnormal dispersion; (c) normal dispersion: optical spectra and RF spectra of polarization-resolved outputs

1.3 空间复用

在光学空间复用是通过改变腔内增益介质的位置破坏谐振腔的对称性,引起双向传输的两束振荡激光在增益介质中不对称地放大,从而完成不对称的非线性效应的积累,不同的非线性相位偏移引起两脉冲一定的光程差,最终输出具有不同重复频率的两锁模脉冲序列。由于双重频脉冲在腔内的

光学路径完全一致,两脉冲的重复频率保持变化的协同性,而重频差值大小可以受到两脉冲的群速度延时差和中心波长差的影响,对总腔长随机变化不敏感。

2008 年,面向潜在的光纤陀螺应用,Kieu 等研究了基于碳纳米管饱和吸收体的环形腔全光纤锁模激光器的双向锁模效应,发现顺时针(clock-wise, CW)和逆时针(counter-clock-

wise, CCW)方向输出的脉冲宽度约为 600 fs, 其重频差在 ± 10 Hz 内可调^[40]。2016 年他们在此基础上报道了可稳定运行的双向环形腔双频锁模激光器, 重复频率约为 72 MHz, 重频差为 82 Hz^[41]。2014 年, 北京航空航天大学赵欣报道了一种基于 SWNT 的双向、双波长锁模激光器, 通过调整腔内损耗, 实现了具有不同中心波长的双向锁模以及百 Hz 的大范围可变重频差^[42], 明确了脉冲波长差对于重频差的影响, 为有效控制双向激光器的重频差提供了途径。

通常单腔双光梳激光器由于共享可饱和吸收体, 会使得两列脉冲在可饱和吸收体发生非线性作用进而引起不稳定, 尤其是有很强的非线性作用时还会导致两列脉冲自同步^[43]。2018 年, Minoshima 团队为了避免此效应, 报道了一种非共享饱和吸收体的双向双光梳激光器^[44], 如图 4(a)所

示。该激光器采用两个半导体可饱和吸收镜(saturable absorber mirror, SAM)并工作于不同的方向, 与非线性偏振旋转(nonlinear polarization rotation, NPR)共同作用下实现混合锁模, 不但避免了双向脉冲在可饱和吸收体处的非线性作用, 而且使输出的脉冲具有低相位噪声。在没有温控的情况下, 重频差的标准偏差为 0.14 Hz, 艾伦偏差 0.01 Hz, 如图 4(b, c)所示。此外, 他们还通过自参考技术测量了载波包络偏移频率(f_{CEO}), 首次测量了没有主动稳频控制的单腔双光梳的每个 f_{CEO} 在 1 000 s 内的变化都约为 1 MHz, 对应的载波包络偏置频率差 Δf_{CEO} 约 5.5 MHz, 标准偏差仅为 30.5 kHz, 而 Δf_{CEO} 的大小仅仅取决于泵浦电流。具有高稳定性的 Δf_{CEO} 对于双光梳光谱学这种需要稳定拍频的测量应用来讲是至关重要的。

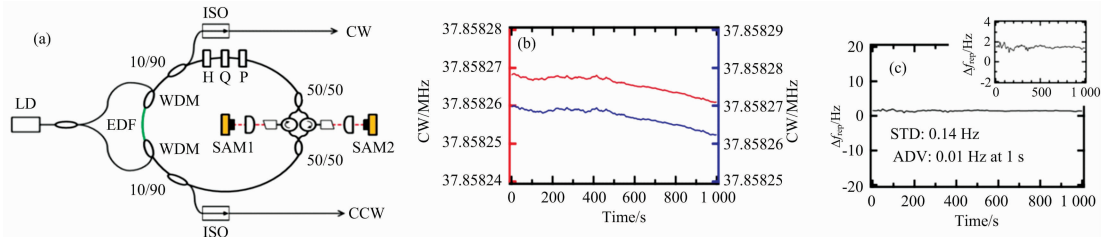


图 4 (a) 双向双光梳光纤激光器结构; (b) 重复频率的波动; (c) 重频差的标准频差和艾伦偏差

Fig. 4 (a) Experimental setup of bidirectional dual-comb fiber laser; (b) fluctuation of the repetition rates; (c) the difference in the repetition rate (Δf_{rep}). STD: standard deviation, ADV: Allan deviation. Inset: magnified of (c)

1.4 脉冲波形复用

上述复用双梳产生方法中的光脉冲在波长范围、偏振态或传输方向上具有显著的不同特性, 而是否可以在一个锁模光腔内产生具有相同波长范围、偏振态和传输方向的不同光脉冲则是另一个有趣的研究思路。

2015 年, 北航郑铮团队提出了一种碳纳米管锁模激光器结构, 实现了脉冲波形复用的双光梳锁模激光器^[45], 其结构和输出特性如图 5 所示。该激光器利用腔内的起偏器及其保偏光纤尾纤的双折射导致了一定深度的 Lyot 滤波效应。同

时, 起偏器与腔内非线性效应结合可以产生非线性偏振旋转效应, 与物理锁模器件相结合形成混合锁模机制^[46]。对于腔内脉冲能量较低的脉冲, 线性滤波起主要作用, 此时锁模光谱较窄; 对于腔内脉冲能量较大的脉冲, 非线性偏振旋转效应出现使得锁模光谱变宽。因此在腔内整体功率较高时, 能同时出现不同能量和不同域特性的脉冲。由于不同锁模机制的同时作用, 该激光器的双频锁模输出光谱重叠并且偏振方向一致, 其时域互相关信号证明了两种脉冲之间具有良好的互干性。

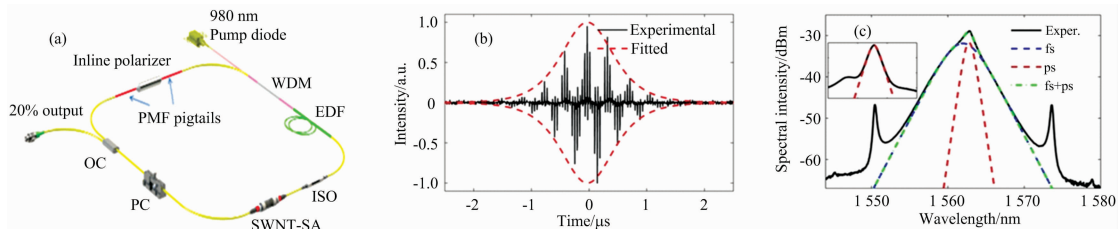


图 5 (a) 脉冲波形复用激光器结构; (b) 时域干涉图; (c) 双梳光谱

Fig. 5 (a) Schematics of pulse-shape-multiplexed dual-comb laser; (b) time domain interferogram; (c) spectrum of dual-comb laser

1.5 保偏光纤双梳激光器

随着单腔双光梳产生技术的不断发展和各种相干测量应用的开展, 近几年对提高单腔双光梳光源的稳定性也开展了研究。通常采用的方法是利用保偏光纤来构成激光器, 优点是保持光的偏振态不易受到外力的影响, 具有更高的稳定性。2018 年, 北京航空航天大学王如柳等基于 SWNT 实现

了单腔保偏型双梳激光器^[47], 其结构如图 6(a)所示, 利用波片和偏振片引入光谱滤波效应获得了重频差 700 Hz 的双波长锁模输出。2018 年, 胡明列团队报道了一种基于 NALM 和 Sagnac 滤波的全保偏双波长锁模激光器^[48], 其结构如图 6(b)所示。其中, 环形部分充当 NALM, 相反方向的线性偏振光获得不同的非线性相移, 并在偏振分束器(polarization

beam splitter, PBS)2 产生偏振干涉从而获得梳状滤波效应, 线型部分的非互易移相器提供额外的相移积累以实现锁模自启动。同时, 通过调整 1/4 波片(quarter-wave plate, QWP) 即图 6(b)中的 QWP2 来调节腔内损耗以实现不同的双波长锁模。该光源在连续 90 min 内的重复频率差波动小于 0.1%, 表明了该保偏双光梳光源具有长期稳定性。2019 年, Jakob Feller 报道了一种类似的 NALM 保偏掺镱双波长激光器, 其滤波方法是通过腔内的空间光栅实现的机械可调带阻滤波, 同时通过微调还可实现对频差的动态控制, 在连续 200 min 内对重复频率与重频差进行了监测, 由于空间光路部分的影响, 得到的标准偏差分别为 12 和 1.7 Hz^[49]。

2016 年, Kolano 等提出从基于两个反射式半导体可饱和吸收镜(semiconductor saturable absorber mirror, SESAM)的具有两个环路的全保偏激光器产生两列正交偏正的脉冲序列, 这种设计虽然实现了固定偏振的输出, 但两个脉冲序列经历的光腔有很大的区别, 对其稳定性具有一定的影响^[50]。以上保偏型激光器都有部分光路为自由空间光路, 因此在功能实现和集成方面较为困难。

2019 年, 日本名古屋大学 Nishizawa 研究组报道了一种

保偏光纤结构的双向激光腔^[51], 如图 6(c)所示。为避免对 SWNT 的损伤以及脉冲同步作用, 采用与参考文献[44]类似的双分支结构, 通过双路的可调谐衰减器控制腔内增益与损耗, 最终实现双光梳输出。封装后加入温度控制装置, 在监测的 7 h 内, 重复频率最大变化 20 Hz, 重频差最大变化 1 Hz, 并通过对窄带滤波器的光谱分析, 验证了该激光器的稳定性。2019 年, 日本丰田工业大学 Luo Xing 等报道了一种全腔共享的线型部分保偏全光纤双波长激光器^[26]。该结构采用 SESAM 和光纤反射镜构成线型腔, 腔内的偏振相关保偏波分复用器(wavelength division multiplexer, WDM)和其余保偏光纤构成 Lyot 滤波器, 通过控制一段非保偏部分的偏振控制器可以实现双波长锁模, 如图 6(d)所示。这种基于可饱和吸收体的锁模方式以及全光纤的结构, 更容易实现低阈值锁模和集成封装。

保偏单腔双光梳锁模激光器的锁模方式通常采用的是 NALM 和可饱和吸收体, 本文对已报道的不同结构保偏双光梳的输出特性做了总结, 如表 1 所示。尽管 NPR 的锁模方式同样有着高功率输出的优势, 但将其与全保偏光纤结合的锁模方式还较为困难。

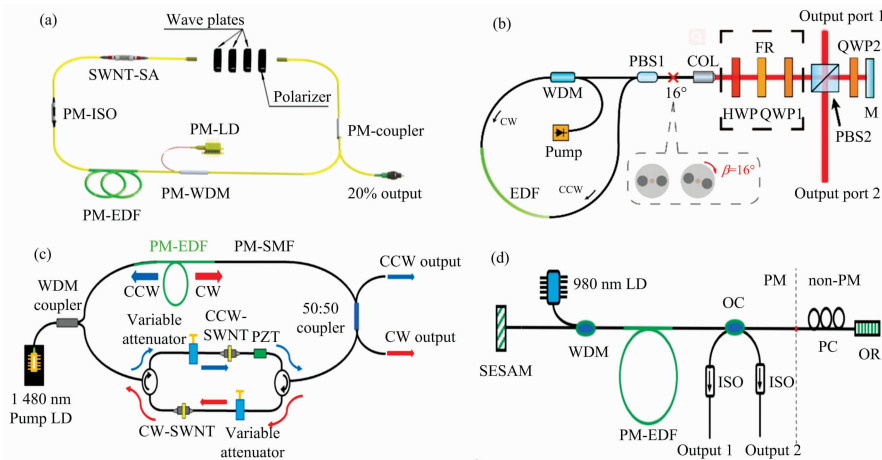


图 6 (a)基于 SWNT 的保偏型激光器结构; (b)基于 Sagnac 滤波的保偏双波长锁模激光器结构; (c)双向全保偏光纤激光器结构; (d)双向部分保偏光纤激光器结构

Fig. 6 Structures of (a) polarization maintaining laser based on SWNT; (b) polarization-maintaining dual-wavelength mode-locked laser based on Sagnac filter; (c) all-PM dual-comb fiber laser with SWNT; (d) bidirectional partly polarization-maintaining fiber laser

表 1 已报道的保偏双光梳锁模光纤激光器的输出特性

Table 1 Output characteristics of reported dual-comb mode-locked laser based on polarization-maintaining fiber laser

文献	锁模机制/复用方式	Wavelength /nm	3 dB bandwidth /nm	f_{rep} /MHz	f_{rep} /Hz	SNR /dB	输出功率 /mW
[47]	SWNT/波长复用	1 560.6/1 552.6	3.01/1.65	24.3	700	60	0.2
[48]	NALM/波长复用	1 570/1 581 1 581/1 594	1.86/2.49 2.6/3.0	40.52 40.52	930 1 082	60	1.2/0.38
[49]	NALM/波长复用	1 030/1 060	15/7	77	2 600	80	1~2
[35]	NALM/偏振复用	1 562.7/1 563.7	8/8	22.7	9 500	80	0.5
[51]	SWNT/空间复用	1 562.6/1 562.8	7.1/6.4	28	105~140	80	5.8/1.2
[52]	SESAM/波长复用	1 557.7/1 562.7	0.8/1.1	18.8	239	70	/

2 单腔双光梳的光谱学应用

双梳光谱学(dual-comb spectroscopy, DCS)是一种新兴的光谱测量工具,其利用具有微小重复频率差的相干双光梳在光电探测器上干涉产生一系列拍频微波梳,成功将光学频率一对一地转换到电学组件可探测的微波频段,如图 7(a)所示。因此待测样品的光谱响应可以通过低速光电探测器采集拍频得到的时域干涉信号进行傅里叶变换来重建光学频率梳的频域光谱信息^[52],并且获得单次光谱信息的最小采样时间等于重复频率差的倒数。因此,双光梳光谱学能够实现对样品光谱响应的超高分辨率、高灵敏度的快速测量,突破传统光谱仪的尺寸约束和仪器响应极限。在测量系统中,可以

使用不同的方式将待测样品的响应编码到梳齿上,有非对称和对称两种,如图 7(b)所示。前者只让一个光梳通过样品传输,与另一个本振光梳干涉,能够测量相位和振幅响应;后者让两个光梳同时通过样品,只能测量样品的吸收,但更适用于有振动的路径测量。

随着光梳技术的发展,双光梳光谱学也在逐渐成熟并将超越传统光谱仪在实验室和户外的应用。目前,该技术已经在超宽谱的近红外光谱测量、光谱激光雷达、远程大气等气体监测、亚波长空间分辨率的近场显微成像、分子频率的高精度计量等应用具有重要意义,进而可延伸到受激拉曼散射非线性光谱、相干反斯托克斯拉曼光谱,以及双光子光谱等领域,覆盖了整个从紫外到太赫兹的超宽频率范围,如图 8 所示。

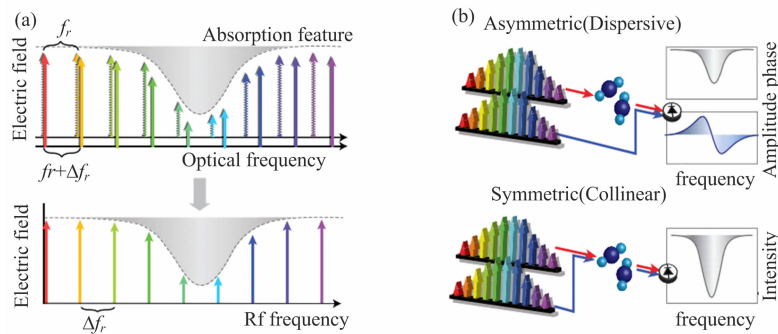


图 7 (a) 双光梳光谱探测下转换原理; (b) 两种不同测量方式

Fig. 7 (a) Principle of spectral measurement; (b) two different path measurement methods

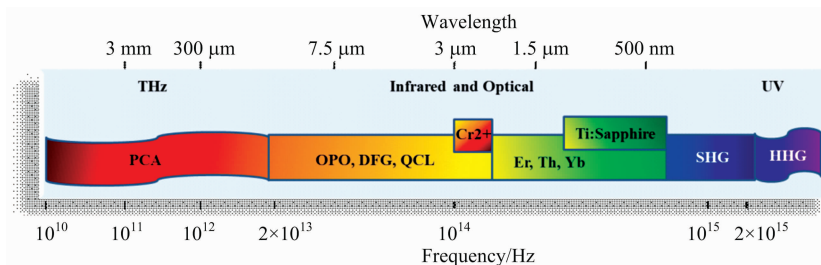


图 8 双梳测量的频谱范围以及相应的双光梳源技术

Fig. 8 The spectral range of dual-comb measurement and the corresponding dual-comb source technologies

随着光纤光梳的发展,双光梳光谱学在近红外波段、可见光波段以及紫外波段得到了大量的研究,在超宽带范围内达到了梳齿分辨率和高信噪比,可分别通过近红外锁模激光器、光纤光梳的二次谐波产生(second harmonic generation, SHG)^[53]和高次谐波产生(high harmonic generation, HHG)来实现。另一方面,具有更强的光谱特征的长波段也是人们所关注的重点,包括中红外($3 \sim 5 \mu\text{m}$)和远红外波段($6 \sim 13 \mu\text{m}$)以及太赫兹波段。中红外和远红外光梳可以通过近红外光梳源基于频差发生器产生(difference frequency generation, DFG)^[54],或采用中/远红外锁模激光器^[55]、光学参量振荡器(optical parametric oscillator, OPO)^[56]、微谐振器以及量子级联激光器(quantum cascade laser, QCL)^[57]等来实现,而太赫兹则可通过光导天线(photoconductive antenna, PCA)^[58]来实现。

理想光频梳的梳齿具有极窄的线宽和绝对的频率,而实际上目前实验所采用的双光频梳分为三种:自由振荡光梳、高度相关光梳和稳频光梳。其中,自由振荡光梳由于信号相干叠加时间有限,分辨率和频率精度都较低。稳频光梳可以同时获得高分辨率、绝对的频率精度以及高信噪比,但是由于需要庞大的电子控制系统,其复杂度和成本将大大提高。因此一种能够产生高度相关双光梳的单腔双光梳激光器脱颖而出,由于腔内共模噪声的被动抑制作用,无需复杂的电子控制系统就能够实现大带宽、梳齿分辨率的实时测量,并且可以通过增大相干平均时间来实现高信噪比,可显著简化整个光谱测量系统。双梳光谱学作为一种轻便灵活的光谱测量工具,不断地朝着小型化、高分辨率和高精度的方向发展,未来在实验室和户外的许多应用中将替代传统的傅里叶变换红外光谱仪的应用。

2016 年, 北航赵欣基于一个自由运行的双波长激光器实现了单腔双光梳光谱测量系统。激光器的锁模中心波长分别为 1 533 和 1 544 nm, 重复频率 52.74 MHz, 重频差 1 250 Hz, 10 min 内重频差标准差为 16 mHz, 相对线宽为 250 Hz, 经过分别放大展宽后成功测量了乙炔 (C_2H_2) 气体在 1 528~1 543 nm 范围内的光谱响应^[25]。利用具有不同重频的双光梳在低速光电探测器处拍频获得了周期性时域干涉信号, 并对其分别进行傅里叶变换得到光谱响应信息, 在 199 次相干平均后, 吸收光谱的信噪比可达 100, 最终获得了 188 MHz (1.5 pm) 的光谱分辨率, 验证了单腔双光梳激光器的稳定性和实用性。

同年, 美国 Kieu 研究组采用双向输出的飞秒锁模光纤激光器构建了一种单腔双光梳光谱探测系统, 双向输出脉冲的光谱覆盖基本相同, 1 s 内梳齿相对线宽为 1.6 kHz, 对氰化氢 (HCN) 的吸收谱进行了测量, 经 15 次相干平均后信噪比为 50, 光谱分辨率约 1 GHz^[59]。2017 年, Hebert 等进一步将上述单腔双光梳光谱与自适应方案结合起来运用^[60], 测得了 1 ms 内的相对线宽为 12.9 kHz。为了改善脉冲序列之间的相干性, 利用直接从干涉图中提取的参考信号对干涉图自身的相位和定时误差进行校正, 经过校正后的相对线宽可达 28 Hz, 利用该双光梳光谱系统对 HCN 吸收谱测量时, 相干平均次数可增加到 700, 信噪比提高到 300, 分辨率达 822 MHz。2019 年 Łukasz A. Sterczewski 等基于偏振复用双梳激光器实现了对低压下受多普勒限制的 HCN 吸收谱的测

量。在 200 ms 的相干平均时间内, 可获得超过 1.7 THz 的光谱范围, 并且在太赫兹范围内获得超过 1% 的透过率精度^[34]。

为了将单腔双光梳光源拓展到具有更高灵敏度的更长波长的光谱波段, 2018 年, 胡明列团队基于一个双波长掺铒锁模光纤激光器测量了腔内光学路径的水分子吸收谱 (1 940 nm), 获得了 43.4 pm 的分辨率^[61]。2019 年, 郑铮团队又运用孤子自频移 (soliton self-frequency shift, SSFS) 技术, 通过改变注入到非线性光纤中的功率, 在距种子双波长掺铒光纤激光器约 100 nm 的地方生成了低噪声的双光梳光谱, 测量了 1 647~1 663 nm 范围的甲烷 $2\nu_3$ 能带吸收谱线^[62], 相干平均次数达 5 135 (1.96 s), 信噪比为 150, 残余标准差为 0.005 8。通过对比从 1 552 nm 种子脉冲和转换后的 1 650 nm 波段的甲烷光谱吸收, 发现自由运行的双光梳掺铒光纤激光器的光谱经过非线性转换后, 仍然具有较好的互相干性和稳定性, 可以实现高质量的双光梳光谱探测。该实验表明单腔双光梳激光器可以通过进一步非线性光谱扩展获得更大的测量范围。

北航团队同日本德岛大学 Yasui 团队合作, 在 2018 年实现了使用单腔双光梳光纤激光器泵浦的太赫兹时域光谱学测量^[63]。进而, 2020 年双方率先报道了测量吸收线宽低至 25 MHz 的低压下氰化甲烷分子光谱, 该研究中将单腔双光梳光纤激光器同自适应 THz 双频梳光谱学技术结合, 有效地补偿残余时间抖动所引起的光谱分辨率性能劣化^[64], 其系统

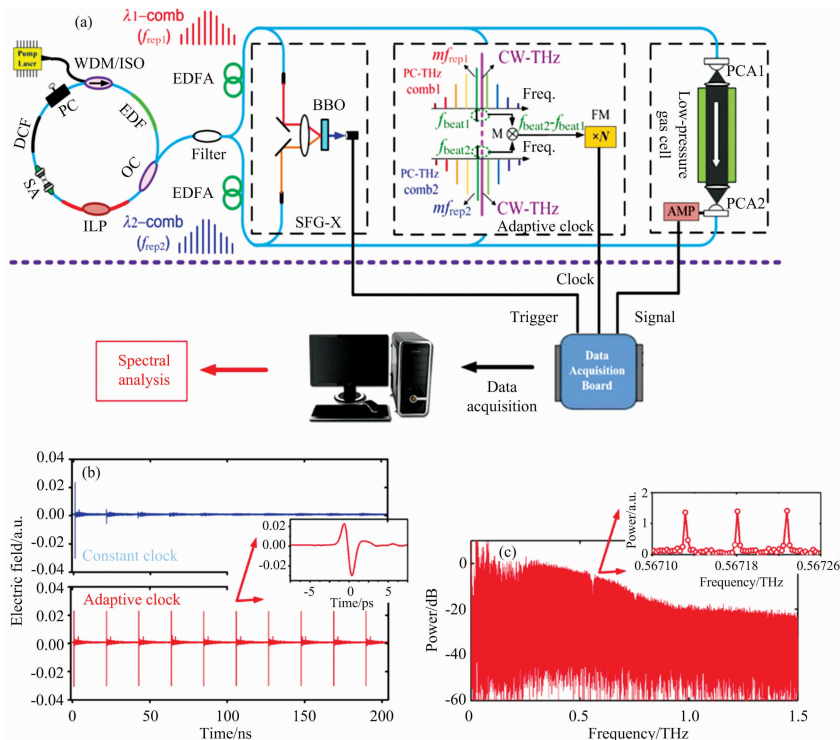


图 9 (a) 光梳模式分辨自适应采样 THz-DCS 的结构; (b) 使用不同采样时钟的平均 100 000 次的时间波形比较插图: 主要 THz 脉冲的放大图; (c) 常压下通过空气的梳齿模式分辨 THz 谱插图: 0.567 2 THz 左右的放大图

Fig. 9 (a) Configuration of comb-mode-resolved adaptive sampling THz-DCS; (b) comparison of the temporal waveforms averaged 100 000 times obtained with different sampling clocks. Inset: a zoomed-in plot of the main THz pulse; (c) comb-mode-resolved THz spectrum through air at room pressure. Inset: a zoomed-in plot around 0.567 2 THz

与结果如图 9 所示。这一兼具高光谱分辨率和低系统复杂度的 THz 频梳光谱学技术的极致实现形式将大大降低实际使用的门槛,推进 THz 光谱学技术在气体分析等应用中的实际使用。

总之,基于自由运行的单腔双光梳激光器测量系统,尽管在泵浦和环境影响下不可避免地存在着重复频率等的漂移问题,但由于单腔光源的固有相关性,其在多种应用场景中的测量结果能满足许多实际应用的需求。如何进一步提高此类光源的环境稳定性也是可以进一步研究的科学问题。

3 总结与展望

介绍了单腔双光梳激光器的技术原理和性能及基于不同

生成机制的单腔双光梳激光器的研究现状,重点阐述了目前单腔双光梳激光器在不同波段实现的光谱学应用,并总结了在发展中仍然存在的问题。目前,重点关注以下几个方面研究,一是进一步提高单腔型双光梳激光腔的主要性能参数,以满足不同应用对于精度等指标的更高要求;二是探索单腔双光梳系统中在中红外波段以及太赫兹波段的谱学测量应用;三是高可靠性单腔双光梳激光器的实用化。相信未来单腔双光梳技术在环境监测、激光雷达、生物成像等诸多领域会发挥非常重要的作用。

References

- [1] Hänsch T W. Review of Modern Physics, 2006, 78(4): 1297.
- [2] Udem T, Holzwarth R, Hänsch T W. Nature, 2002, 416(6877): 233.
- [3] Elzinga P A, Lytle F E, Jian Y N, et al. Applied Spectroscopy, 1987, 41(1): 2.
- [4] Fiechtner G J, King G B, Laurendeau N M, et al. Applied Optics, 1995, 34(6): 1108.
- [5] Chen J, Zhao X, Yao Z J, et al. Optics Express, 2019, 27(8): 11406.
- [6] Baumann E, Giorgetta F R, Swann W C, et al. Physical Review Letters, 2011, 84(6): 062513.
- [7] Guay P, Tourigny-Plante A, Hébert N B, et al. Applied Optics, 2020, 59(7): B35.
- [8] Ycas G, Giorgetta F R, Friedlein J T, et al. Optics Express, 2020, 28(10): 14740.
- [9] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, et al. Nature Photonics, 2009, 3(6): 351.
- [10] Liu T A, Newbury N R, Coddington I, et al. Optics Express, 2011, 19(19): 18501.
- [11] Lin B K, Zhao X, He M Z, et al. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(6): 7106508.
- [12] LI Yue-peng, CAI Ya-wen, LI Run-min, et al(李月鹏,蔡雅雯,李润敏). Chinese Optics Letters(中国光学快报), 2019, 17(9): 091202.
- [13] Zhao X, Zheng Z, Liu L, et al. Optics Express, 2012, 20(23): 25584.
- [14] Ideguchi T, Poisson A, Guelachvili G, et al. Nature Communications, 2014, 5: 3375.
- [15] Cassinerio M, Gambetta A, Coluccelli N, et al. Applied Physics Letter, 2014, 104(23): 231102.
- [16] Lee K, Lee J, Jang Y S, et al. Scientific Reports, 2015, 5: 15726.
- [17] Li B W, Xing J, Kwon D, et al. Optica, 2020, 7(8): 961.
- [18] Okazaki D, Morichika I, Arai H, et al. Optics Express, 2020, 28(14): 19997.
- [19] Torres-Company V, Weiner A M. Laser & Photonics Review, 2014, 8(3): 368.
- [20] Deniel L, Weckenmann E, Galacho D P, et al. Optics Express, 2020, 28(8): 10888.
- [21] Del'Haye P, Schliesser A, Arcizet O, et al. Nature, 2007, 450(7173): 1214.
- [22] Yu M J, Okawachi Y, Griffith A G, et al. Nature Communications, 2018, 9: 1869.
- [23] Luo Z C, Luo A P, Xu W C, et al. IEEE Photonics Journal, 2010, 2(4): 571.
- [24] Zhao X, Zheng Z, Liu L, et al. Optics Express, 2011, 19(2): 1168.
- [25] Zhao X, Hu G Q, Zhao B F, et al. Optics Express, 2016, 24(19): 21833.
- [26] Luo X, Tong H T, Than S S, et al. Optics Express, 2019, 27(10): 14635.
- [27] Zhu Y J, Cui Z K, Sun X G, et al. Optics Express, 2020, 28(19): 27250.
- [28] Chen J, Zhang T L, Wang R L, et al. Dual-Wavelength, Dual-Comb Fiber Laser Based on a Nearly-Adiabatic Fiber-Taper Filter, Frontiers in Optics, 2016, JTh2A. 112.
- [29] Luo X, Tuan T H, Saini T S, et al. Optics Communications, 2020, 463: 125457.
- [30] Shi H S, Song Y J, Li R M, et al. Nanotechnology and Precision Engineering, 2018, 1(4): 205.
- [31] Gong Z, Zhao X, Hu G Q, et al, Polarization Multiplexed, Dual-Frequency Ultrashort Pulse Generation by a Birefringent Mode-Locked Fiber Laser, Conference on Lasers and Electro-Optics, 2014, JTh2A: 20.
- [32] Liu Y, Zhao X, Zhao B F, et al. High-Resolution, Dual-Comb Spectroscopy Enabled by a Polarization-Multiplexed, Dual-Comb Femtosecond Fiber Laser, Conference on Lasers and Electro-Optics, 2016, AM4K: 5.
- [33] Zhao X, Li T, Liu Y, et al. Photonics Research, 2018, 6(9): 853.

- [34] Sterczewski L A, Przewloka A, Kaszub W, et al. *APL Photonics*, 2019, 4: 116102.
- [35] Nakajima Y, Hata Y, Minoshima K. *Optics Express*, 2019, 27(10): 14648.
- [36] Link S M, Mangold M, Golling M, et al. *Gigahertz Dual-Comb Modelocked Diode-Pumped Semiconductor and Solid-State Lasers*, Proceedings of SPIE, 2016: 9734.
- [37] Kovalev A V, Uskov A V, Vitkin V V, et al. *Dual Comb Mode-Locked Laser: Design and Stabilization*, Progress in Electromagnetics Research Symposium-Spring, 2017: 1135.
- [38] Chang M T, Liang H C, Su K W, et al. *Optics Express*, 2015, 23(8): 10111.
- [39] Liang H C, Wu C S. *Optics Express*, 2017, 25(12): 13697.
- [40] Kieu K, Mansuripur M. *Optics Letters*, 2008, 33(1): 64.
- [41] Mehravar S, Norwood R A, Peyghambarian N, et al. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(23): 231104.
- [42] Zhao X, Zheng Z, Liu Y, et al. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(17): 1722.
- [43] Hu G Q, Pan Y L, Zhao X, et al. *Optics Letters*, 2017, 42(23): 4942.
- [44] Nakajima Y, Hata Y, Minoshima K. *Optics Express*, 2019, 27(5): 5931.
- [45] Liu Y, Zhao X, Hu G Q, et al. *Optics Express*, 2016, 24(19): 21392.
- [46] Liu Y, Zhao X, Liu J S, et al. *Optics Express*, 2014, 22(17): 21012.
- [47] Wang R, Zhao X, Bai W, et al. *Polarization-Maintaining, Dual-Wavelength, Dual-Comb Mode-Locked Fiber Laser*, Conference on Lasers and Electro-Optics, 2018, JTh2A: 139.
- [48] Li R M, Shi H S, Tian H C, et al. *Optics Express*, 2018, 26(22): 28302.
- [49] Fellinger J, Mayer A S, Winkler G, et al. *Optics Express*, 2019, 27(20): 28062.
- [50] Kolano M, Molter D, Ellrich F, et al. *All-Polarization-Maintaining, Polarization-Multiplexed, Dual-Frequency, Mode-Locked Fiber Laser*, Conference on Lasers and Electro-Optics, 2016, AM2J: 3.
- [51] Saito S, Yamanaka M, Sakakibara Y, et al. *Optics Express*, 2019, 27(13): 17868.
- [52] Coddington I, Swann W C, Newbury N R. *Physical Review*, 2010, 82(4): 043817.
- [53] Potvin S, Genest J, et al. *Optics Express*, 2013, 21(25): 30707.
- [54] MA Jin-dong, LU Qiao, DUAN Dian, et al(马金栋, 路 桥, 段 典). *Chinese Journal of Quantum Electronics(中国量子电子学报)*, 2019, 36(4): 428.
- [55] Bernhardt B, Sorokin E, Jacquet P, et al. *Applied Physics B*, 2010, 100(1): 3.
- [56] Jin Y W, Cristescu S M, Harren F J M, et al. *Applied Physics B*, 2015, 119(1): 65.
- [57] Gustavo V, Andreas A, Stephane B, et al. *Nature Communications*, 2014, 5: 5192.
- [58] Yasui T, Iyonaga Y, Hsieh Y D, et al. *Optica*, 2015, 2(5): 460.
- [59] Mehravar S, Norwood R A, Peyghambarian N, et al. *Applied Physics Letter*, 2016, 108(23): 231104.
- [60] Hébert N B, Genest J, Deschênes J D, et al. *Optics Express*, 2017, 25(7): 8168.
- [61] Liao R Y, Song Y J, Liu W, et al. *Optics Express*, 2018, 26(8): 11046.
- [62] Chen J, Zhao X, Yao Z J, et al. *Optics Express*, 2019, 27(8): 11406.
- [63] Hu G Q, Mizuguchi T, Oe R, et al. *Scientific Reports*, 2018, 8: 11155.
- [64] Chen J, Nitta K, Zhao X, et al. *Advanced Photonics*, 2020, 2(3): 036005.

A Review of Single-Cavity Dual-Comb Laser and Its Application in Spectroscopy

ZHU Zhi-gao¹, LIU Ya^{1*}, YANG Jie¹, HU Guo-qing^{2,3}

1. Yunnan Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology, School of Physics and Electronic Information Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China
2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China
3. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China

Abstract Optical frequency comb is widely used in high precision measurement and metrology because of its characteristics such as constant frequency interval, wavelength stability, narrow spectral line width and wide spectral band width. Among them, the fast dual-comb measurement, including spectroscopy, absolute ranging, 3D imaging and ultra fast asynchronous optical sampling, has become one of the research hotspots. The dual-comb spectroscopy system based on free-running single-cavity dual-comb laser has attracted much attention due to its advantages of simple structure, large measurement range and high accuracy. This article first introduces the features of the optical frequency comb in the time domain and frequency domain and its application, especially the advantages of the dual-comb measurement. Compared with the current mainstream dual-comb source schemes, such as frequency-stabilized and phase-locked mode-locked laser, electro-optic modulation and so on, the single-cavity dual-comb laser scheme is expected to avoid the use of complex electronic control system and simplify the structure and decrease the volume and the cost of the dual-comb source. Therefore, this paper mainly introduces single-cavity dual-comb fiber laser technology with wavelength-multiplexing, polarization-multiplexing, space-multiplexing and pulse-shape-multiplexing, and analyzes the basic principles, performance parameters and current research progress, as well as the existing problems in the current development of these technologies. Moreover, the researches and performances of polarization-maintaining fiber dual-comb lasers with higher stability are summarized. Then, this paper introduces the principle of dual-comb spectroscopy, reviews the current spectral extension technology, and introduces some application cases of dual-comb spectroscopy based on the free-running single-cavity dual-comb laser in detail, including the near infrared band of the erbium-doped fiber laser and the detection extended to mid-infrared and terahertz bands. Finally, we summarize the development trends of single-cavity dual-comb lasers, including further improving frequency stability of single-cavity dual-comb lasers, decreasing the common-mode noise of single-cavity lasers, exploring the application of single-cavity dual-comb system in mid-infrared and terahertz band, and making single-cavity dual-comb mode-locked fiber laser to be practical.

Keywords Optical frequency comb; Dual-comb spectroscopy; Mode-locked laser; Asynchronous optical sampling

(Received Oct. 21, 2020; accepted Feb. 3, 2021)

* Corresponding author