doi：10.11823/j.issn.1674-5795.2022.05.07

单腔双光梳激光器及其应用研究

侯皓严[1]，邹晓旭[1]，马小睿[1]，陈嘉宁[1]，闫明[2]，袁帅[1*]

（1.上海理工大学 光电信息与计算机工程学院，上海 200093；
2.华东师范大学 精密光谱科学与技术国家重点实验室，上海 200062）

摘　要：双光梳技术凭借其超高的频率分辨力与检测精度成为当今科研领域探索的重点。本文分别介绍了利用电光调制、微谐振腔、相位锁定两台独立的锁模激光器、单腔双光梳激光器产生双光梳的方法，重点阐述了基于单腔双波长激光器的双光梳产生方法集成度高、结构较简单、成本低的优势；之后详细介绍了目前单腔双光梳激光器中，双波长腔内运转的脉冲波形复用法、空间复用法、方向复用法、波长复用法和偏振复用法的工作原理及最前沿的研究进展；最后，具体分析了单腔双光梳在光谱学、测距、光纤传感等领域的应用情况，并展望未来单腔双光梳的研究与发展方向，为推动单腔双光梳技术性能的进一步提升和广泛应用提供借鉴。

关键词：光频梳；单腔双光梳；光纤超短脉冲激光器；双光梳光谱；锁模光纤激光器

中图分类号：TB96　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1674-5795(2022)05-0061-13

Review of single-cavity dual-comb laser and its application

HOU Haoyan[1], ZOU Xiaoxu[1], MA Xiaorui[1], CHEN Jianing[1], YAN Ming[2], YUAN Shuai[1*]

(1.School of Optical-Electrical and Computer Engineering,
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2.State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: In recent years, the dual optical comb technique has become a hot topic in the field of scientific research due to its ultra-high frequency resolution and detection accuracy. In this paper, the methods of generating dual-combs using electro-optical modulation, micro-resonator, two phase-locking independent mode-locked lasers and single-cavity dual-comb laser are introduced respectively. The advantages of the dual optical comb generation method based on single-cavity dual wavelength laser, such as high integration, simple structure and low cost, are emphasized. After that, the working principle and the latest research progress of the multiplexing methods for the dual-wavelength operation in single-cavity dual comb lasers, such as pulse waveform multiplexing, space multiplexing, direction multiplexing, wavelength multiplexing and polarization multiplexing are described in details. Finally, the applications of single-cavity dual optical combs in spectroscopy, ranging, fiber sensing and other fields are presented, and future research and development directions of single-cavity dual-combs are prospected, which can provide reference for promoting the further improvement of technical performance and wide application of single-cavity dual-optical comb.

Key words: optical frequency comb; single cavity dual comb; ultra-short pulse fiber laser; dual-comb spectrum; mode-locked fiber laser

收稿日期：2022-07-29；**修回日期：**2022-09-09

基金项目：国家重点研发计划(2018YFB0504400)；重庆市面上项目(cstc2021jcyj-msxmX1217)

引用格式：侯皓严，邹晓旭，马小睿，等. 单腔双光梳激光器及其应用研究［J］. 计测技术，2022，42（5）：61-73.

Citation：HOU H Y，ZOU X X，MA X R，et al. Review of single-cavity dual-comb laser and its application［J］. Metrology and measurement technology，2022，42（5）：61-73.

0 引言

光学频率梳（Optical Frequency Comb，OFC）[1]是一系列频率间隔相同，且相位相干的频率梳齿。光学频率梳成功链接了光学频率与射频频率，并拥有极精确的梳齿间隔，在天文光谱标定[2-3]、光原子钟[4-5]、物理常数测距[6]、频率测量[1, 7-8]等高精度计量领域具有广泛的应用前景。2005年，美国国家标准技术研究院J. Hall教授和德国马普量子光学所T. Hænsch教授，由于对“超精细激光光谱学，包括光学频率梳技术”的贡献，共同分享了当年的诺贝尔物理学奖[9]。

在科学研究和实际应用中，对于持续时间极短的脉冲信号，光电探测器难以直接识别和探测，针对此类信号的传统检测手段一般为相关检测，从而实现间接测量。绝大多数情况下，相关检测系统中需要使用机械位移元件，其在信号扫描速度方面具有局限性。近年来，双光梳测量技术兴起并被人们广泛关注[10]。该技术采用两套相干光频梳，它们的频率间隔被精确锁定但存在微小差异，在时域上会对应产生微小频差，工作时依靠不同脉冲之间的时间走离来完成采样工作。双光梳测量技术的特点是灵敏度、分辨力、采样率均较高。双光梳光源的主要产生方法为：①在微谐振腔中一次性产生两组光频梳[11]；②分别使用两台独立的锁模激光器来完成频率的锁定[12]；③对同一激光器进行电光调制[13]等。但这些方法存在一定缺陷：微谐振腔的器件制作工艺要求较高；两台独立的锁模激光器系统较为复杂；电光调制法产生的梳齿数量不足等。随着科技的发展，使用同一台锁模激光器得出两组锁模脉冲串，从而实现单腔双光梳的方法被报道[14]。由于两组脉冲均存在于环境相同的同一谐振腔中，因此能在保持两套光频梳之间高相干性的前提下，有效抑制共模噪声，且极大地降低整个系统的复杂性。

本文对光频梳、双光梳的基本原理与产生方法进行介绍，重点阐述基于不同复用方法的单腔双光梳光纤激光器的工作原理和研究现状，并对双光梳在光谱测量、测距等领域的应用情况进行探讨，最后展望单腔双光梳技术未来的发展方向，为促进单腔双光梳技术的进一步发展和应用提供参考。

1 光学频率梳与双光梳

1.1 光学频率梳基本原理

如图1所示，在时域上，光学频率梳为一组超短脉冲序列，脉冲序列的时间间隔固定，脉冲强度$E(t)$随时间t的变化而变化；在频域上，光学频率梳为一系列频率间隔固定的频率齿的集合，脉冲强度$E(f)$随频率f的变化而变化。光梳中等间隔的频率齿被称为“梳齿”，梳齿均拥有窄线宽稳频连续激光器的频率精度[15]。设飞秒激光脉冲的重复周期为T，其倒数f_{rep}为激光脉冲重复频率，对应频域上谱线的频率间隔，即光频梳的梳齿间距。由于相速度和群速度存在差异，故产生了包络和脉冲载波的相位差$\Delta\varphi_{cep}$，使得频域上梳齿相对于零频移动了f_{ceo}，f_{ceo}被称为载波包络偏移频率。频域上第n根梳齿的绝对频率$f(n) = n \times f_{rep} + f_{ceo}$。

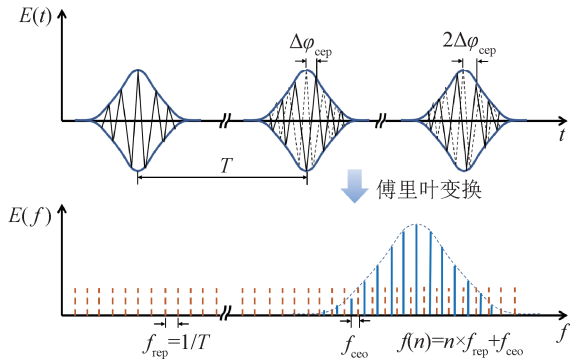


图1 光频梳的时域和频域特性

Fig.1 Characteristics of optical frequency comb in time domain and frequency domain

当激光重复频率发生变化时，梳齿在横轴方向上将会有拉伸（$n \times f_{rep}$发生改变）。当偏频发生变化时，梳齿会在横轴方向上产生整体偏移。在锁模飞秒激光中，当重频和偏频均被锁定时，频域上每一根谱线的频率将会保持高度稳定，即实现了飞秒光梳。

如图2所示，光频梳由锁定f_{rep}与f_{ceo}的激光振荡器产生。振荡器输出的低功率光频梳经放大器放大，通过（f-2f）干涉仪实现光频梳拍频探测。其中，振荡器输出的脉冲激光重复频率由其腔长决定。锁定重频的方法为光电二极管（Photo Diode，PD）接收光脉冲，得到实际的重复频率，然后与频率基准比较产生拍频信号，使用该信号

控制压电陶瓷（PZT）完成腔长的反馈过程，从而达到锁定重频的效果。偏移频率的提取与锁定可以采用（*f*–2*f*）自参考锁定法[16]，即将光学频率梳中第*n*个梳齿通过倍频晶体进行倍频，其频率大小变为$2\times(nf_{rep}+f_{ceo})$，但是第$2n$个梳齿没有通过倍频，其频率为$2nf_{rep}+f_{ceo}$，将第*n*个梳齿和第$2n$个梳齿拍频，即可提取出偏移频率$f_{ceo}$，之后再利用锁相环，改变泵浦激光的功率实现偏频的锁定。

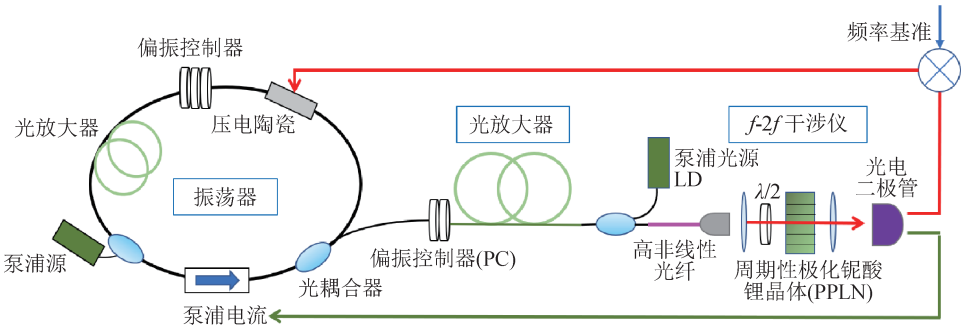


图2　飞秒光梳产生系统示意图

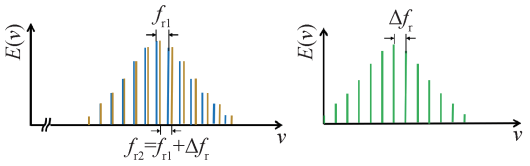
Fig.2　Schematic diagram of femtosecond optical comb generation system

重复频率和偏移频率均被锁定后，光频梳将具有极好的频率稳定性，同时锁模振荡器产生的时域超短脉冲，在频域对应宽带光谱。上述特征使光频梳能够应用于高精度测量领域。在光谱精密测量领域，光频梳作为光源，可用于气体吸收谱测量并获取分子指纹[1]，亦可用于物质测定[17]，有效克服了一般光谱仪存在的分辨力有限、测量速度较慢等问题。在绝对测距领域，飞秒光学频率梳以其极高的稳定度和溯源能力，现已达到微米量级的测量误差水平[6]。

1.2　双光梳基本原理

如图3（a）所示，脉冲的电场强度$E(\nu)$随频率ν的变化而变化，双光梳由两套具有一定重复频率差的光频梳组成，其重复频率分别为f_{r1}和f_{r2}，其中$f_{r2}=f_{r1}+\Delta f_r$。光频梳1的第*k*根梳齿的频率为$f_k^1=kf_{r1}+f_{ceo1}$，光频梳2的第*k*根梳齿的频率为$f_k^2=kf_{r2}+f_{ceo2}$，将两套光频梳进行拍频，得$f_{RF}=k\Delta f_r+\Delta f_{ceo}$，其中$\Delta f_{ceo}=|f_{ceo1}-f_{ceo2}|$。拍频后将形成一个间隔距离（为$\Delta f_r$）不变的射频域频率梳，建立起光频和射频间的定量联系，如图3（b）所示，之后再将射频域的梳齿信息转换到光频域[18]，即可获得光频域的梳齿信息。

利用双光梳光谱法测量分子吸收谱时，两组光梳分别发出探测光和参考光，探测光通过样品池后获取样品的吸收谱信息。使用光电探测器采集参考光与探测光拍频获得的时域干涉图样，之后对图像进行傅里叶变换等处理，最终得出待测样品的光谱图。



(a) 光频域　(b) 射频域

(a) Optical frequency domain　(b) Radio frequency domain

图3　双光梳的特性

Fig.3　Characteristics of dual combs

与单光梳相比，双光梳因其结构简单、测量速度更快、能够对信号进行相干平均，使得信噪比得到一定提升，且在保证测量准确性的同时提升扫描速度，故双光梳具有更大的技术优势。

1.3　双光梳产生方法

窄脉冲宽度、高重复频率、宽光谱范围、高稳定性的双光梳光源是实现双光梳光谱仪的必备条件。其中，窄脉冲宽度能够实现更高的电场强度与更强的非线性过程，高重复频率能够实现更短的探测时间及更高的探测精度，宽光谱范围意味着能够检测更广泛的物质种类，高稳定性能够有效满足野外、星载、车载等多种潜在场景下的应用需求。目前，产生双光梳光源的方法主要包括使用电光调制、微谐振腔、锁模激光器等，使用锁模激光器的方法又可细分为使用两台独立的锁模激光器和使用同一台锁模激光器。

1.3.1 电光调制

对同一台激光器进行电光相位调制产生少量梳齿，之后再经过放大器放大，同时使用高非线性光纤（HNLF）展宽，最终可以得到能够被实际使用的双光梳。2016年，德国马普所Picqué等研究者[19]研制的掺铒双光梳系统输出光谱半高全宽0.13 nm，中心波长1569 nm，展宽后的梳状谱由1350多条独立谱线组成，每条谱线功率0.18 mW。2017年，M. Yan等人[21]使用强度调制器和非线性光纤的组合增加梳状线数量，产生了超过1200条的梳状线。2020年，巴黎-萨克雷大学的L. Deniel等人[22]提出了由声光调制器（Acousto-Optic Modulator，AOM）和硅马赫-曾德尔调制器（Mach-Zehnder Modulator，MZM）实现的双光梳方案。光路最终产生两列重复频率分别为f_{rep1}= 500 MHz，f_{rep2}=（500+4）MHz的脉冲序列，电光调制器输入信号的重复频率f_{AOM}=40 MHz，最终实现了带宽24 GHz的双光梳输出。2021年，H. Yu等人[23]使用马赫-曾德尔干涉仪（Mach-Zehnder Interferometer，MZI），将MZI进行级联，并结合数字误差校正系统，实现了一种基于无源全光纤脉冲延迟方法的重复频率倍增双梳光谱，其采用自适应后处理算法，避免了使用复杂的闭环反馈电子系统。该仪器具有结构紧凑、宽带、高能量效率和低复杂度等优点。系统利用低带宽锁相环将两光梳的重复频率锁定在57.2002 MHz和57.2000 MHz，差频为200 Hz，光谱中心波长1560 nm左右，半高全宽约20 nm。

电光调制双光梳的重复频率容易达到GHz以上，重复频率差可达MHz量级，且无需电路稳频系统。但是，使用电光调制的方法直接产生的双光梳梳齿数量较少，后续还需经放大器进行放大以及非线性扩谱，增加了系统的成本和复杂度。

1.3.2 微谐振腔

微腔光梳即采用微谐振腔结构实现光频梳，由于微谐振腔体积小、便于实现多相干光源，更有利于系统集成和商业化使用，近年来得到了快速发展。此外，微腔本身的特性也为实现太赫兹光梳、中远红外光梳等提供了便利。

片上克尔双光梳是利用连续激光分别泵浦两个微谐振腔，再通过级联四波混频产生的。2016年，M. Suh等人[11]使用两台光纤激光器在1549.736 nm和1549.916 nm中心波长处分别泵浦二氧化硅微腔，利用声光调制器反馈控制泵浦激光频率，实现孤子锁定，得到克尔微腔双梳。该方法产生的双光梳重复频率为数十GHz量级，通过调整微腔长度，重频差可达MHz量级。但是，该方法对谐振腔的品质因子要求较高，需要精密的调节系统和较高的半导体加工工艺，因此，获得高相干克尔光频梳的整体难度较高，且由于该方法获得的梳齿间距较大，故光谱分辨能力受限。

近年来，在芯片上刻蚀光学微腔的方法被广泛报道，该方法极大地提高了系统的紧凑性，有效减小了系统体积。其原理是使用泵浦光源对存在于不同芯片的光学微腔分别进行激发，获得频率不同的脉冲，从而实现双光梳，包括两种设计思路：一种是串联型，在同一光路上布置两个谐振腔，泵浦激光以一定顺序先后通过两谐振腔；另一种是并联型，首先进行分束，之后再分别泵浦。

2022年，S. Ansari等研究者[24]设计了并联型微腔光梳系统，该系统的芯片底座上布置有600 nm厚的铌酸锂（Lithium-Niobate，LN），首先在LN上刻蚀谐振腔，然后盖上二氧化硅对其进行保护，之后在两个芯片上分别进行相同的刻蚀操作。实验中，重复频率分别为f_1 = 192.7 THz，f_2 = 186.1 THz的2束连续激光被分为2组，一组直接输入谐振腔EOC1，另一组则通过声光移频器（Acousto-Optical Frequency Shifter，AOFS）进行移频后输入谐振腔EOC2，所偏移的频率分别为δ_{f1} = 40 MHz，δ_{f2} = 25 MHz。EOC1和EOC2分别使用f_{RF1} = 10.4530 GHz和f_{RF2} = 10.4531 GHz作为泵浦源，且要求$f_{RF2}-f_{RF1}$ = 0.1 MHz，得到的光梳谱线数量为162条，光谱宽度1.7 THz，对乙炔气体进行吸收光谱测量，光谱谱线分辨力为10.453 GHz。

2018年，A. Dutt等人[25]设计了串联型微腔光梳系统。实验采用同一中心波长为1561.42 nm的连续激光进行泵浦，两个级联氮化硅微环的半径分别为50.04 μm和49.98 μm。通过加热器使2个微环谐振腔共振产生频率梳，频率梳的重复频率分别为f_{rep1}=（451.4±0.4）GHz，f_{rep2}=（452.8±0.4）GHz，故重频差δ_{rep}=（1.4±0.8）GHz，

正好位于常用光电二极管的工作带宽内。所得到的频率梳频谱带宽为51 THz（400 nm）。2019年，中科院Z. Li等人[26]设计了一种微波双注入片上双梳光源，该装置基于太赫兹量子级联激光器（Quantum Cascade Laser，QCL），两个腔长为6 mm、脊宽为150 μm的QCL梳状晶片位于同一晶片上。研究团队采用微波双注入技术稳定梳状波的频率，经研究发现：在较低的射频功率下串联型微腔双波长激光器，光梳的带宽可从86 GHz显著拓宽到166 GHz，线宽由自由运行时的1.14 MHz降低到微波双注入时的490 kHz。

1.3.3 两台独立的锁模激光器

将两台独立且重复频率接近的锁模激光器进一步相位锁定，是最直观的构建双光梳的手段，常规方法主要有两种：一种是两台激光器独立工作，使用电路反馈系统来完成两套光频梳的锁定；另一种是直接提高单个光梳的相干性，具体方法为把两套光频梳同时锁定到两台激光器中。

近年来，研究人员开始利用自适应方法，使用电路系统分别对不同光梳的抖动频率进行监测，用混频的方法将噪声进行削减，进而完成实时的补偿矫正工作，此方法可以很好地处理由梳齿快漂所引发的光谱抖动。2018年，上海理工大学L. Yang等人[27]使用自适应方法设计了双光梳光谱检测分析系统，在单次采样时间为600 μs，信噪比为10时，光谱分辨力达1.09 GHz，该系统存在的问题是双光梳振荡器在温度变化时稳定性不高，信噪比会受到影响。2021年，X. Chen等研究者[28]设计的自适应双光梳使用了温度反馈和压电陶瓷传感器，该双光梳的重复频率为77.2 MHz，种子源是两台掺铒光纤振荡器。采用两个中心波长分别为1550 nm和1564 nm的连续激光并对这两个连续激光的振荡器之间的拍频信号进行补偿，从而获得四个拍频信号，之后采用压电陶瓷传感器进行电压反馈，并采用多级温度反馈技术，得到了一个0.19 MHz的稳定拍频信号。E. Kaya等人[29]使用CMOS微波宽带自适应双光梳进行液体化学检测，该团队使用超宽带混频器对两个频率梳进行外差处理，产生双梳输出，采用台积电65 nmCMOS技术，所研制的系统可实现实时自适应相位和时间校正。

上述自适应双光梳系统需要设计复杂的反馈控制电路，且整个系统占地面积大，造价均在百万元左右，目前难以实现商业应用。

1.3.4 单腔双光梳激光器

参考光纤通信中的多路复用技术，通过对偏振、波长或传输路径等的复用，在同一个谐振腔中产生两组重复频率不同的脉冲从而形成双光梳的方法，称为单腔双光梳。单腔双光梳的产生方法可归纳为方向复用、波长复用、空间复用、偏振复用、脉冲波形复用等。

由于双光梳的两个脉冲序列由同一台飞秒激光器产生，两个脉冲所经历的环境相同，因此信噪比得到提升。且两个脉冲之间具有极高的相干性，不需要为了保证两脉冲间的相干性而设计复杂的系统和算法，极大地节约了成本。使用同一台锁定重复频率的光纤飞秒激光器产生的双光梳，还具有宽光谱、窄脉宽的优点。宽光谱范围意味着能够检测更广泛的物质种类，而窄脉宽则意味着更高的峰值功率，可应用于非线性研究。由于单腔双光梳相较其他双光梳具有不可比拟的优势，因此近年来获得了研究人员的广泛关注。下面对使用单腔双光梳法产生双光梳的原理与研究进展进行详细介绍。

2 单腔双光梳光纤激光器

2.1 偏振复用

偏振复用是指利用双折射介质快慢轴间的折射率差异，使得共存于一个腔内的两个具有正交偏振状态的脉冲序列之间发生重复频率的偏移。当谐振腔中增益介质为非保偏介质（非保偏光纤）时，非保偏光纤中的弱双折射效应使得不同偏振态的光折射率产生差异，光纤双折射引起的群速度失配无法被各偏振态之间的非线性相互作用所补偿时，光纤中将产生重复频率不同的两套光梳。当谐振腔中增益介质为保偏介质（保偏光纤）时，两脉冲的偏振态是正交的，利用保偏介质的双折射效应产生两脉冲间的重复频率差，从而获得双光梳。

2017年，美国波士顿大学的A. E. Akosman等人[31]使用内线偏振控制器挤压单模光纤的方法产生双光梳。如图4（a）所示，在铥–钬共掺光纤激

光器中，基于矢量孤子产生超快激光脉冲，该脉冲由共同产生的等强度正交偏振的两连续脉冲组成，正交偏振脉冲串经过光干涉后，形成两个稳定的微波射频拍梳，脉冲中心波长 1975 nm，3 dB 半高全宽 9.8 nm，产生的双光梳重复频率分别为 67.622100 MHz 和 67.622610 MHz，重复频率差为 510 Hz。实际上，一般光纤中的双折射现象十分微小，而在保偏光纤中则更易产生双折射。2018 年，北航 X. Zhao 等人[32]将一段长 0.38 m 的保偏掺铒光纤（Erbium-Doped Fiber，EDF）引入非保偏单模腔中，产生偏振态接近于正交的两组异步脉冲，重频差达百赫兹量级且可以动态调整，在净正色散状态和反常色散状态下，分别可以产生对偶耗散矢量孤子和对偶矢量孤子，系统光路示意图如图 4（b）所示。2019 年，该团队与日本德岛大学 T. Yasui 团队合作[33]，通过进一步探索，设计了一套自适应的偏振复用双光梳光源，可用于太赫兹波段的异步采样。自适应采样方法有效地防止了单腔双梳激光器中残留的定时抖动对双梳光谱性能的影响，得到的两光梳重复频率约 48.8 MHz，重频差 190 Hz，双梳光经掺铒光纤放大器（Erbium-Doped Fiber Amplifier，EDFA）分离放大后，光谱展宽，脉冲时间被压缩到约 110 fs，所获得的脉冲持续时间足以驱动宽带太赫兹梳状谱。同年，Y. Nakajima 等研究者[34]使用全保偏非线性放大环形镜来提升光梳稳定性，在其设计的激光器中，两套偏振光分别在光纤的快轴和慢轴上传输，通过对非共路部分光程进行调整可改变重频差。

此外，对于固体激光器而言，采用包括掺镱钙铝氧化钆晶体（Yb：CALGO）、掺镱钨酸钆钾晶体（Yb：KGW）、掺钕氟化锂钇（Nd：YLF）等在内的双光轴晶体，也可以实现偏振复用双重复频率脉冲的输出。由于固体激光器可采用更短的腔长，因此重复频率可达 GHz 量级[35]，对应更小的重复频率差。但双波长运转的固体激光器锁模性能不佳，且系统结构相对复杂，限制了该方法的实际应用。

2.2 波长复用

波长复用的原理为在同一飞秒激光器谐振腔内，调节两套脉冲序列使其中心波长产生微小差异，导致群速度色散情况不同，使得激光器中所输出的脉冲序列存在重频差，从而实现单腔双光梳。

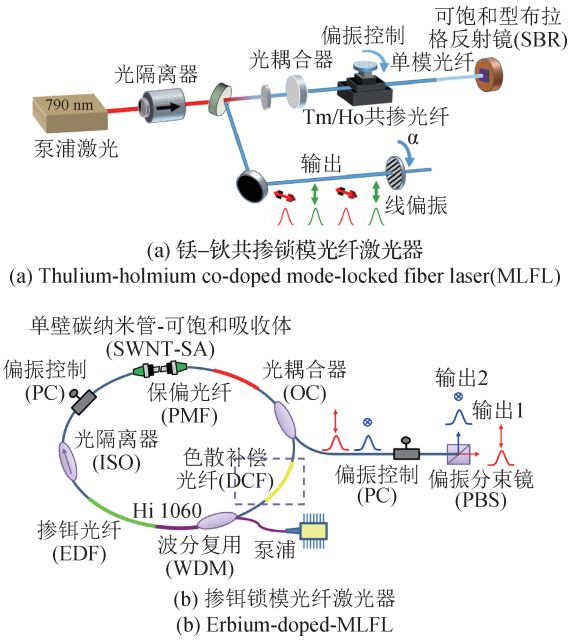


图 4 偏振复用光纤激光器

Fig.4 Polarization-multiplexed fiber lasers

通过在腔内加入光谱滤波器件，实现波长复用。基于偏振干涉效应的 Lyot 滤波器由于滤波深度可调、光纤兼容性良好等优点，得到了广泛关注。2016 年，北航 Z. Zheng 等人[28]在掺铒锁模光纤激光器中插入 PBS 和长约 0.25 m 的保偏光纤，形成 Lyot 滤波器，使用光学沉积法制备出单壁碳纳米管（Single-Wall Carbon Nanotube，SWNT）锁模激光器结构。激光器的频谱滤波和腔内损耗调节效应形成双波长锁模，输出脉冲的重复频率为 52.74 MHz，偏移频率为 1.25 kHz。经过 20 ms 的采样时间，所得信号的傅里叶变换曲线的尖峰宽度为 250 Hz，远小于双梳偏移频率，这表明光梳的相对线宽较小，拥有较高的光谱分辨能力。Sagnac 滤波器也是一种正弦频谱滤波器，其原理与 Lyot 滤波器相似，同样可实现波长复用。2018 年，天津大学胡明列等人[36]设计了全保偏掺铒锁模光纤激光器，此激光器基于 Sagnac 滤波器和非线性放大环形镜（NALM）所设计，光纤环形腔中存在顺时针（Clockwise，CW）振荡激光和逆时针（Counter-Clockwise，CCW）振荡激光。为了得到双折射干涉滤波的效果，实验组将环形结构的末

端同保偏光纤熔接，之后，对1/4波片（Quarter-Wave Plate，QWP）进行调整，从而调节损耗，得到不一样的双波长锁模。通过研究，最后在1570 nm处得到1.86 nm谱宽的双波长锁模，在1581 nm处得到2.49 nm谱宽的双波长锁模，且双光梳光源稳定性高，90 min内重频差波动小于0.1%。此外，也有研究人员使用凹陷滤波器实现了双波长锁模，重频差可在百赫兹至千赫兹范围内调谐[37]。

近年来，有研究人员在波长多路复用方案的基础上，进一步提出了子波长多维复用方案。2021年，哈尔滨工业大学H. Sun等人[38]设计了一种基于子波长多维复用的集成式双环锁模激光器。该系统同时产生四个光谱带宽至少为1.3 nm的光频率梳，采用双环光路分离结构实现子复用，采用波长相关的光谱滤波器实现波长复用，最终产生两组双光梳。两组双光梳分别从子环（subring）1和子环2处输出，其中子环1输出的双光梳中心波长分别为λ_{c1}=1546.7 nm，λ_{c2}=1558.4 nm，子环2输出的双光梳中心波长分别为λ_{c3}=1546.3 nm，λ_{c4}=1568.0 nm。生成的梳状结构的带宽可达2.8 nm，比纯波长多路复用方案的带宽更宽。该实验证明了多维复用方案的可扩展性，在此基础上可进一步发展三维或更多维的多路复用，促进潜在的多光梳应用。

2.3 方向复用

方向复用的原理为传播方向不同的光场，由于经过光纤及相关器件的顺序有所不同，两方向脉冲序列的重复频率存在差异，从而实现双光梳。

方向复用双光梳激光器大多工作于净负腔色散，导致光谱范围和输出能量受限，如何解决该问题是人们研究的热点。2019年，日本电气通信大学的Y. Nakajima等研究者[39]针对光谱范围限制问题进行了研究，在该团队设计的掺铒光纤激光器系统中，可通过调整光程差的方式，实现双光梳重复频率差的大范围改变，同时，通过色散的管理，能够实现净色散趋近于零，使得最终的光谱宽度在50 nm以上。针对输出能量受限问题，2020年，美国的B. Li等研究者[40]设计了工作于全正色散区的双向掺镱锁模光纤激光器，实验使用非线性偏振旋转技术（NPR），锁模脉冲处于耗散孤子区，实验输出脉冲能量超过1 nJ，中心波长1070 nm处光谱宽度20 nm。

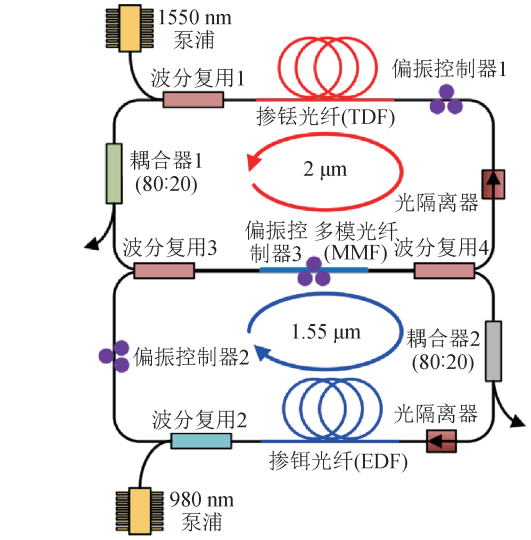
2021年，日本德岛大学的T. Mizuno等人[41]使用方向复用型单腔双光梳激光器作为光源，设计了一套可进行计算图像校正的双梳显微镜（Dual-Comb Microscopy，DCM），这是首次将单腔双光梳光纤激光器（Single-Cavity Dual-Comb Fiber Laser，SCDCFL）应用于双梳成像显微镜。两组光梳的中心波长均为1550 nm，其中顺时针光频梳（CW-OFC）作为本地光梳（Local OFC），平均功率7 mW，重复频率f_{rep_cw} = 43.038493 MHz；逆时针光频梳（CCW-OFC）作为信号光梳（Signal OFC），平均功率190 mW，重复频率f_{rep_ccw} = 43.037370 MHz，故重复频率差Δf_{rep} = 1.123 kHz，光梳模式数达到4493000。实验组还利用自参考图像，补偿了SCDCFL中由双光梳之间的残余定时抖动引起的图像模糊，对共焦振幅和相位成像进行了计算校正，拥有较好的抑制图像模糊的潜力。借助人工智能算法校正，上述基于方向复用双光梳光源的双光梳显微系统有望进一步提升图像质量，并应用于动态目标成像领域。

2.4 空间复用

空间复用指通过对各个谐振腔的长度进行调整，从而调节两脉冲的重复频率和重复频率差，进而得到双光梳的复用手段。

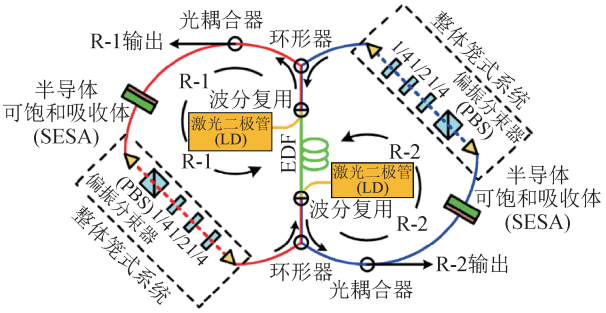
前述的各种方法中，有研究人员采用了非共路腔的空间结构得到双光梳，这也可视作一种空间复用。2020年，清华大学K. Zhao等研究者[42]利用非线性多模干涉技术，实现了两种不同波段下的双色孤子光纤激光器，装置示意图如图5（a）所示。两谐振腔共用带有“单模（SMF）-多模（MMF）-单模”光纤结构的可饱和吸收体，MMF长度可灵活选择，即使稍微调整MMF的长度，双色孤子仍然可以存在。实验得到两套超短脉冲的重复频率分别为26.44276 MHz和26.97776 MHz。2020年，哈尔滨工业大学R. Yang等研究者[43]提出了使用双子环激光器实现空间复用的方法，如图5（b）所示，双子环结构由一个共享的增益光纤公共路径和两个对称的子路径组成，以公共路径作为整个双环激光器的增益介质。公共路径和两个子路径之间使用环形器连接，以保证激光在每个子路径上单向传播。该系统也可用于产生三

光梳，从子环 R-1 中输出两束脉冲组成双光梳，子环 R-2 中输出一束脉冲。子环 R-1 中输出的双光梳重复频率分别为 47.00198 MHz 和 47.00436 MHz，重频差 2.38 kHz，信噪比 40 dB。该系统与前述 H. Sun 等人[38]研究的系统结构较为相似，均使用子环生成多组光梳，这种多维空间复用的方法也为未来在同一激光腔内构造三个及以上光梳奠定了基础[44]。



(a) 双色锁模光纤激光器

(a) Dual-color MLFL



(b) 多维复用锁模激光器

(b) Multidimensional multiplexing mode-locked laser

图 5 空间复用锁模光纤激光器

Fig.5 Spatial multiplexing MLFL

2.5 脉冲波形复用

脉冲波形复用的原理为：当激光腔内能量较高时，时域特性和能量不同的脉冲同时出现，不同的锁模机制同时产生作用，进而产生双光梳。前述的双光梳产生方法中，不同的两套光脉冲或在波长、或在偏振态、或在传输方向上存在显著差异，而若要在同一个谐振腔内产生波长、偏振态、传输方向均相同的不同光脉冲，就需要利用脉冲波形复用的方法。

2016 年，Y. Liu 等研究者[45]实现的双光梳锁模激光器如图 6 所示。使用光学沉积法制备 SWNT 锁模激光器结构，其在 1550 nm 处插入损耗为 1.5 dB。通过调整偏振控制器，可观察到激光光谱干涉滤波，脉冲的带宽由周期性光谱调制所限制，其周期由双折射量决定。因此，当泵浦功率较低时，能量较低的脉冲带宽较窄。当脉冲能量升高时，非线性偏振旋转（NPR）效应将发挥作用，降低高光强脉冲的线性偏振相关损失，脉冲收缩，形成更短、频谱更宽的脉冲，在泵浦功率升高的情况下，引入腔内的线性和非线性脉冲的成形机制导致了不寻常的输出分岔，时域特性有一定差异的两脉冲同时出现，进而产生双光梳。

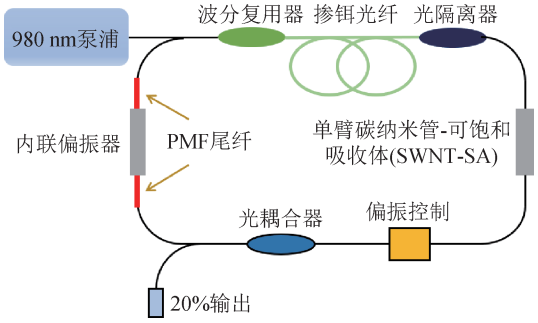


图 6 脉冲波形复用双梳激光器结构示意图

Fig.6 Structure diagram of pulse-shape-multiplexed dual-comb laser

3 单腔双光梳的应用

3.1 光谱学应用

光谱学是单腔双光梳技术的一个重要应用方向。双光梳光谱的使用原理由 S. Schiller 在 2002 年首次提出[46]，即利用光梳的高相干性，采用线性异步光采样的方法，将单腔双光梳作为光源，实现光谱的测量。由于利用了两套相干光梳作为光源，因此被称为双光梳光谱（Dual-comb Spectroscopy，DCS）。不同于传统光谱技术，双光梳光谱技术具有精度更高、扫描速度不受机械元件移动速度限制、更易达到高信噪比等优点。此后，各国纷纷开展了对 DCS 的深入研究，并研制出诸如腔增强型 DCS、开放路径型 DCS、自适应型 DCS 等双梳光谱装置，具体参数如表 1 所示。

表1　双梳光谱(DCS)性能指标

Tab. 1　Performance indexes of DCS

所用方法	信噪比	分辨力	光谱范围
波长复用型DCS[17]	/	43.4 pm	/
光电DCS[19]	2600 (52 ms)	0.3 GHz	35 GHz
波长复用型DCS[28]	100	188 MHz	15 nm
偏振复用型DCS[33]	59	5 MHz	/
方向复用型DCS[47]	50	1 GHz	约15 nm
双梳光声光谱[49]	/	约100 kHz	>20 GHz
可编码DCS[50]	33.6	540 MHz (208 μs)	60 nm
腔增强型DCS[52]	380 (18 μs)	4.5 GHz	20 nm
腔增强型光电DCS[53]	189 (320 s)	0.203 GHz	50 GHz
开放路径型DCS[54]	588 (300 s)	0.1 GHz	32 nm
自适应DCS[55]	20 (467 μs)	1.1 GHz	14.5 THz
拉曼DCS[56]	1000 (296 μs)	120 GHz	42 THz

2016年，K. Kieu等人[47]采用方向复用法，使用飞秒锁模光纤激光器构建了单腔双光梳光谱测量系统，光谱分辨力约1 GHz，15次相干平均后信噪比为50。同年，北航X. Zhao团队[48]使用波长复用法搭建锁模激光器实现DCS，激光器输出的两脉冲序列重复频率分别为f_{rep1}=52.74 MHz，f_{rep2}=1.25 kHz+52.74 MHz，中心波长分别为1533 nm和1544 nm。使用该系统测量乙炔气体（C_2H_2），光谱分辨力达188 MHz （1.5 pm），经199次相干平均，信噪比达100。2018年，天津大学胡明列团队[17]采用双波长法实现掺铒锁模光纤激光器单腔双光梳，测定在1940 nm附近的水分子吸收峰，分辨力为43.4 pm。

近年来，双光梳光谱学在更多方面有了新的研究进展。2020年，T. Wildi等人[49]通过将双梳光谱学（DCS）的概念与光声检测相结合，提出了双梳光声光谱学（Dual-frequency Comb Photoacoustic Spectroscopy，DCPAS）新技术。将该技术应用于检测乙炔气体，光波中心波长约1535 nm，梳齿数量约为40，重复频率f_{rep}^1=1 GHz，f_{rep}^2=1 GHz+125 Hz，光谱分辨力达到100 kHz。2021年，华东师范大学X. Zou等人[50]报道了一种可编码的DCS技术，编码光谱的重复频率为108 MHz，光谱覆盖范围为1520~1580 nm。与传统双梳谱相比，编码双梳谱在4个编码频带下将短期信噪比提高了3.65倍，测量速度也有所提升。2022年，波兰哥白尼大学的D. Charczun等人[51]报道了一种双梳腔模式宽度和模式色散光谱仪，是腔内模式宽度和模式色散光谱的首次双梳实现。使用电光调制器产生约1 GHz重复频率的光梳，声光调制器将梳状结构向更高频率方向移动约78 MHz。该偏移连同锁定光束的172 MHz的降频，匹配增强腔的250 MHz自由光谱范围，最终产生25 GHz的可用带宽，光梳重频差可达200 kHz。

3.2　单腔双光梳的测距应用

飞行时间测距法是飞秒光梳测距的重要方法之一，即向待测目标发射光脉冲，通过接收待测目标返回的信号，得到光脉冲在空间中的飞行时间，从而获得距离信息[30]。双光梳测距解决了传统光梳不能进行任意绝对测距的问题，同时兼顾了测量范围和测量效率。2009年，I. Coddington等研究者[57]首次将双光梳用于测距，提出双飞秒光梳异步光学采样测距原理（ASOPS），即：两个飞秒光梳，一个为本振光梳，另一个为测量光梳，测量光梳通过待测路径后携带距离信息，由本振光梳对携带距离信息的测量光梳进行线性光学采样，还原得出距离信息，之后再使用相位法测距，即将飞行时间测距法所得结果衔接载波干涉相位，在60 ms的时间平均下，绝对测距误差不高于5 nm。

2013年，J. Lee等人[58]在Coddington提出的ASOPS的基础上进一步研究，将脉冲通过偏振态分解为测量脉冲和参考脉冲，实现无死区绝对距离测量，测距长度达69.3 m，采样时间为200 μs时的测距误差不高于170 μm。2014年，H. Zhang等研究者[59]使用二阶互相关对准脉冲，采用双飞秒光梳异步光学采样测距原理进行测距工作，在0.5 μs的时间下测距误差不高于100 nm。2021年，天津大学M. Hu团队[60]利用单台自由运行的锁模

掺铒激光器实现了远程非合作目标的双梳绝对距离测量，将平均功率为400 mW的信号梳定向到距离约3.46 m处、粗糙度RMS值为1.6的固定阳极氧化铝板上，之后采集回波，在20 Hz的更新速率下，进行2 s平均，测量误差可至2 μm以下。若使用卡尔曼滤波器，则可以在不损失更新速率的情况下，使测量误差不高于225.7 nm。双光梳测距方法参数比较如表2所示。

表2 双光梳测距方法参数比较

Tab. 2 Comparison of indexes of distance measurement with dual-comb

研究人员	测量距离	扫描时间	测量误差
I. Coddington[57]	>1 m	/	0.2 m
J. Lee[58]	69.3 m	200 μs	170 μm
H. Zhang[59]	20 m	0.5 ms	100 nm
M. Hu[60]	约3.46 m	2 s	<2 μm

3.3 其他应用

在光纤传感领域，清华大学J. Guo等人[61]将单腔双光梳使用到了一种可以穿戴的柔性装备上，使其实现了对弯曲、扭转以及拉伸等基本力学动作的监测。贴合人体的传感器可以捕捉和识别人体动作，如：关节的运动、膝盖的弯曲、手部动作等。可见单腔双光梳在动作的动态捕捉、动态监测等方面有很好的发展前景。

在天文领域，可将双光梳作为天文光谱仪的定标光源。与普通光梳相比，双光梳可实现更高稳定度、更高密度的波长定标，加快对天体多普勒频移的扫描速度，进行更大范围、更高精度的检测，有望对观测宇宙膨胀速度、搜索系外行星等研究作出贡献。

4 总结与展望

介绍了光学频率梳和双光梳的基本工作原理，阐述了利用电光调制、微谐振腔、相位锁定两台独立的锁模激光器、单腔双光梳激光器产生双光梳的方法及特点，分析了基于偏振复用、波长复用、方向复用、空间复用、脉冲波形复用五种不同理论方法的单腔双光梳光纤激光器的基本原理和相关研究成果，并总结了双光梳技术在光谱测量、测距等领域中的应用情况。

单腔双光梳激光器具有复杂度低、性价比高等优势，但是其发展时间较短，存在着重频差难以大范围灵活调节的劣势，目前难以实现市场化、大范围的使用，因此，探索实现重频差的更大范围灵活可调，是未来的重点研究方向之一。

使用双光梳进行气体成分测定、原子光谱测量等目前已有广泛报道，为了实现整个光谱测量分析系统的商业化应用，应尽可能地减小系统体积。使用微腔将是重要的发展方向，与普通光纤飞秒激光器相比，微腔光梳的体积更小，更易集成，可在同一系统中搭建并集成多套微腔光梳，从而实现光梳重复频率的提高，进一步提升光梳光谱分辨性能。

未来，单腔双光梳的应用领域将进一步扩展，例如在生物细胞研究领域，将双光梳与光镊技术相结合，用于捕获细胞并获取其拉曼光谱特征信息等。随着单腔双光梳激光器的发展，其实用性和稳定性将进一步提升，相信单腔双光梳技术将在生物医学、医疗器械、矿石鉴定、太空探索、精密测量等领域发挥重要作用。

参考文献

[1] PIXQUE N, HANSH T W. Frequency comb spectroscopy [J]. Nature photonics, 2019, 13(3): 146-157.

[2] 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.

[3] WILKEN T, CURTO G L, PROBST R A, et al. A spectrograph for exoplanet observations calibrated at the centimetre-per-second level [J]. Nature, 2012, 485 (7400): 611-614.

[4] 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.

[5] RIEHLE F. Optical clock networks[J]. Nature photonics, 2017, 11(1): 25-31.

[6] 崔鹏飞，杨凌辉，林嘉睿，等. 飞秒光学频率梳在精密绝对测距中的应用 [J]. 激光与光电子学进展，2018，55 (12)：128-142.
CUI P F, YANG L H, LIN J R, et al. Application of femtosecond optical frequency comb in precise absolute dis-

tance measurement[J]. Laser and optoelectronics progress, 2018, 55(12): 128-142. (in Chinese)

[7] UDEM T, REICHERT J, HOLZWARTH R, et al. Accurate measurement of large optical frequency differences with a mode-locked laser[J]. Optics letters, 1999, 24(13): 881-883.

[8] UDEM T, REICHERT J, HOLZWARTH R, et al. Absolute optical frequency measurement of the cesium D1 line with a mode-locked laser[J]. Physical review letters, 1999, 82(18): 3568-3571.

[9] The Nobel Foundation. The Nobel prize in physics 2005 [EB/OL]. [2005-10-04]. https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2005/summary/.

[10] 武腾飞, 韩继博, 白毓, 等. 双光梳绝对距离测量实验研究[J]. 计测技术, 2022, 42(3): 50-55.
WU T F, HAN J B, BAI Y, et al. Research on absolute distance measurement experiment of double optical comb [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42(3): 50-55. (in Chinese)

[11] SUH M G, YANG Q F, YANG K Y, et al. Microresonator soliton dual-comb spectroscopy[J]. Science, 2016, 354(6312): 600-603.

[12] 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.

[13] TORRES-COMPANY V, WEINER A M. Optical frequency comb technology for ultra-broadband radio-frequency photonics[J]. Laser and photonics reviews, 2014, 8(3): 368-393.

[14] 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.

[15] 谢戈辉, 刘洋, 罗大平, 等. 光纤光学频率梳[J]. 自然杂志, 2019, 41(1): 15-23.
XIE G H, LIU Y, LUO D P, et al. Fiber optical frequency comb[J]. Chinese journal of nature, 2019, 41(1): 15-23. (in Chinese)

[16] 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.

[17] 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.

[18] YCAS G, GIORGETTA F R, BAUMANN E, et al. High-coherence mid-infrared dual-comb spectroscopy spanning 2.6~5.2 μm[J]. Nature photonics, 2018, 12(4): 202-208.

[19] MILLOT G, PITOIS S, YAN M, et al. Frequency-agile dual-comb spectroscopy[J]. Nature photonics, 2016, 10(1): 27-30.

[20] 杨昌喜, 赵康俊, 曹博, 等. 单腔双光梳锁模光纤激光器及其应用研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1501001.
YANG C X, ZHAO K J, CAO B, et al. Recent progress of single-cavity dual-comb mode-locked fiber lasers and their applications[J]. Chinese journal of lasers, 2021, 48(15): 1501001. (in Chinese)

[21] YAN M, LUO P L, IWAKUNI K, et al. Mid-infrared dual-comb spectroscopy with electro-optic modulators [J]. Light science and applications, 2017, 6(10): 17076.

[22] DENIEL L, WECKENMANN E, GALACHO D P, et al. Frequency-tuning dual-comb spectroscopy using silicon Mach-Zehnder modulators[J]. Optics express, 2020, 28(8): 10888-10898.

[23] YU H, QIAN Z, XING H L, et al. Phase-stable repetition rate multiplication of dual-comb spectroscopy based on a cascaded Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics letters, 2021, 46(13): 3243-3246.

[24] SHAMS-ANSARI A, YU M, CHEN Z, et al. Thin-film lithium-niobate electro-optic platform for spectrally tailored dual-comb spectroscopy[J]. Communications physics, 2022, 5(1): 1-8.

[25] DUTT A, JOSHI C, JI X C, et al. On-chip dual-comb source for spectroscopy[J]. Science advances, 2018, 4(3): 1701858.

[26] LI Z, WAN W, ZHOU K, et al. On-chip dual-comb source based on terahertz quantum cascade lasers under microwave double injection[J]. Physical review applied, 2019, 12(4): 44068.

[27] 杨力, 沈旭玲, 杨康文, 等. 自适应双光梳光谱原理分析与实现[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 156-162.
YANG L, SHEN X L, YANG K W, et al. Analysis and realization of adaptive dual-comb spectroscopy[J]. Acta optica sinica, 2018, 38(5): 156-162. (in Chinese)

[28] 陈旭, 金相宇, 王庆婷, 等. 基于压电陶瓷传感器以

及多级温度反馈的小型化自适应双光梳［J］. 光学学报，2021，41（10）：236-243.
CHEN X，JIN X Y，WANG Q T，et al. A miniaturized adaptive dual-comb based on piezoelectric transducer and multi-stage temperature feedback[J]. Acta optica sinica，2021，41(10)：236-243.（in Chinese）

[29] KAYA E，ENTESARI K. A CMOS microwave broadband adaptive dual-comb dielectric spectroscopy system for liquid chemical detection[C]//2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium（IMS），August 4-6，2020，Los Angeles，CA，USA. Los Angeles：IEEE，2020：229-232.

[30] 赵力杰，周艳宗，夏海云，等. 飞秒激光频率梳测距综述［J］. 红外与激光工程，2018，47（10）：218-233.
ZHAO L J，ZHOU Y Z，XIA H Y，et al. Overview of distance measurement with femtosecond optical frequency comb[J]. Infrared and laser engineering，2018，47(10)：218-233.（in Chinese）

[31] 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.

[32] 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.

[33] 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)：36004.

[34] NAKAJIMA Y，HATA 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.

[35] 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.

[36] 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.

[37] 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.

[38] SUN H，LYU H，WU J，et al. Subring-wavelength multidimensional multiplexing for quad-comb generation from an integrated dual-ring mode-locked laser[C]//Twelfth International Conference on Information Optics and Photonics，July 23-27，2021，Xi′an，China. Xi′an：SPIE，2021：82-86.

[39] NAKAJIMA Y，HATA Y Y，MINOSHIMA K. High coherence ultra-broadband bidirectional dual-comb fiber laser[J]. Optics express，2019，27(5)：5931-5944.

[40] LI B W，XING J，KWON D，et al. Bidirectional mode locked all-normal dispersion fiber laser[J]. Optica，2020，7(8)：961-964.

[41] MIZUNO T，NAKAJIMA Y，HATA Y，et al. Computationally image-corrected dual-comb microscopy with a free-running single-cavity dual-comb fiber laser[J]. Optics express，2021，29(4)：5018-5032.

[42] 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.

[43] YANG R，SUN H，LV H，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.

[44] 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.

[45] 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.

[46] SCHILLER S. Spectrometry with frequency combs[J]. Optics letters，2002，27(9)：766-768.

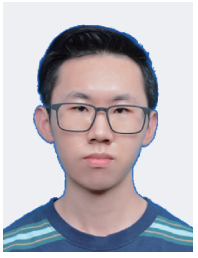
[47] MEHRAVAR S，NORWOOD R A，PEYGHAMBARIAN N，et al. Real-time dual-comb spectroscopy with a free-running bidirectionally mode-locked fiber laser[J]. Applied physics letters，2016，108(23)：231104.

[48] 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.

[49] WILDI T，VOUMARD T，BRASCH V，et al. Photo-acoustic dual-frequency comb spectroscopy[J]. Nature communications，2020，11：4164.

[50] ZOU X, GU C, ZHANG M, et al. 208-μs single-shot multi-molecular sensing with spectrum-encoded dual-comb spectroscopy[J]. Optics express, 2021, 29(17): 27600-27611.
[51] CHARCZUN D, NISHIYAMA A, KOWZAN G, et al. Dual-comb cavity-mode width and shift spectroscopy[J]. Measurement, 2022, 188: 110519.
[52] BERNHARDT B, OZAWA A, JACQUET P, et al. Cavity-enhanced dual-comb spectroscopy [J]. Nature photonics, 2009, 4(1): 55-57.
[53] FLEISHER A J, LONG D A, REED Z D, et al. Coherent cavity-enhanced dual-comb spectroscopy[J]. Optics express, 2016, 24(10): 10424-10434.
[54] 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.
[55] IDEGUCHI T, POISSON A, GUELACHVILI G, et al. Adaptive real-time dual-comb spectroscopy[J]. Nature communications, 2014, 5(1): 1-8.
[56] IDEGUCHI T, HOLZNER S, BERNHARDT B, et al. Coherent raman spectro-imaging with laser frequency combs [J]. Nature, 2013, 502(7471): 355-358.
[57] 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.
[58] LEE J, HAN S, LEE K, et al. Absolute distance measurement by dual-comb interferometry with adjustable synthetic wavelength[J]. Measurement science and technology, 2013, 24(4): 45201.
[59] ZHANG H Y, WEI H Y, WU X J, et al. Absolute distance measurement by dual-comb nonlinear asynchronous optical sampling[J]. Optics express , 2014, 22(6): 6597-6604.
[60] HU D, WU Z, CAO H, et al. Dual-comb absolute distance measurement of non-cooperative targets with a single free-running mode-locked fiber laser[J]. Optics communications, 2021, 482: 126566.
[61] GUO J, ZHAO K J, ZHOU B, 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.

（本文编辑：刘圣晨）



第一作者：侯皓严（2001—），男，主要从事光纤激光、超快非线性等领域的研究。

通讯作者：袁帅（1985—），男，副教授，2014年在加拿大Laval大学获得博士学位，2015年进入上海理工大学工作。曾获得上海市晨光学者、日本学术振兴会希望会士等荣誉称号。主要研究方向为光纤激光、超快光学等。主持国家自然科学基金项目及国家重点研发子课题等项目。