

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.05.01

全固态飞秒光学频率梳研究进展及展望

马骏逸^{1,2}, 韩海年^{1,3*}, 张子越^{1,4}, 魏志义^{1,2,3*}(1. 中国科学院物理研究所 光物理重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 松山湖材料实验室, 广东 东莞 523808; 4. 中国航天科技创新研究院, 北京 100176)

摘要: 自1999年至今, 光学频率梳 (Optical Frequency Comb, OFC) 经历了二十多年的快速发展。基于飞秒激光的光学频率梳在频率计量学、超快光谱学、光学频率标准、阿秒脉冲的产生、多脉冲时域合成等众多前沿研究领域发挥了不可替代的作用。特别是继飞秒钛宝石激光频率梳、飞秒光纤激光频率梳之后, 基于二极管激光直接泵浦的全固态飞秒激光频率梳由于兼具钛宝石激光噪声低、重复频率高, 光纤激光结构紧凑、电光效率高的共同优势, 引起了许多研究组的兴趣, 并取得系列有意义的进展。本文综述了全固态光学频率梳的发展和已取得的典型应用, 并结合笔者所在课题组取得的研究成果, 对全固态光学频率梳未来的发展方向进行展望, 为促进全固态飞秒锁模振荡器的发展提供借鉴。

关键词: 光学频率梳; 全固态飞秒激光; 载波包络相移; 频率锁定; 高重复频率

中图分类号: TB9; O43

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2022)05-0003-10

Research progress and prospect of all-solid-state femtosecond optical frequency comb

MA Junyi^{1,2}, HAN Hainian^{1,3*}, ZHANG Ziyue^{1,4}, WEI Zhiyi^{1,2,3*}

(1. Key Laboratory of Photophysics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Songshan Lake Materials Laboratory,

Dongguan 523808, China; 4. China Academy of Aerospace Science and Technology Innovation, Beijing 100176, China)

Abstract: The optical frequency comb (OFC) has experienced more than 20 years of rapid development since 1999. From the initial laboratory system to the widely used high-tech products, the optical frequency comb based on femtosecond laser has played an irreplaceable role in many frontier research fields, such as frequency metrology, ultrafast spectroscopy, optical frequency standards, generation of attosecond pulses, and multi-pulse time domain synthesis. Especially after the femtosecond Ti: sapphire laser frequency comb and the femtosecond fiber laser frequency comb, the all-solid-state femtosecond laser frequency comb directly pumped by diode laser has attracted the interest of many research groups and made a series of meaningful progress because it has the common advantages of low noise, high repetition rate, compact structure and high electro-optical efficiency. This review summarizes the development and typical applications of all-solid-state optical frequency combs, and looks forward to the future development of all-solid-state optical frequency combs based on the research results achieved by the authors research group, so as to provide reference for the development of all-solid-state femtosecond mode-locked oscillators.

Key words: optical frequency comb; all-solid-state femtosecond laser; carrier envelope phase offset frequency; frequency locking; high repetition rate

收稿日期: 2022-10-14; 修回日期: 2022-10-20

基金项目: 国家自然科学基金委重大研究计划(91850209); 中国科学院战略先导项目(XDA1502040404, XDB21010400)

引用格式: 马骏逸, 韩海年, 张子越, 等. 全固态飞秒光学频率梳研究进展及展望 [J]. 计测技术, 2022, 42 (5): 3-12.

Citation: MA J Y, HAN H N, ZHANG Z Y, et al. Research progress and prospect of all-solid-state femtosecond optical frequency comb [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (5): 3-12.



0 引言

光学频率梳(以下简称光频梳)是在人们对计量精度不断追求的科学激情之下发展起来的。1999年,德国马普量子光学研究所的特奥多尔·亨施(Theodor Hansch)教授研究组首先证明了锁模飞秒脉冲激光的重复频率对应于光频梳的梳齿间隔^[1],在此基础上,他们使用飞秒激光频率梳测量了氢原子1S—2S的共振跃迁频率^[2],测量结果的不确定度为 1.8×10^{-14} ,准确程度超过了所有早期光学频率测量值一个数量级以上。自此之后,光频梳得到了广泛的研究和快速的发展。到目前为止,光频梳主要分为基于锁模激光器的传统光频梳系统和以电光光频梳和微腔光频梳为代表的新型光频梳系统。其中基于飞秒锁模激光器的光频梳又可以根据谐振腔的种类分为钛宝石光频梳、光纤光频梳和全固态光频梳。基于飞秒钛宝石激光和光纤激光的光频梳作为最早的光频梳系统,已成为目前技术最成熟、工业应用最广泛的光频梳,已经深刻地影响着许多研究领域,并开拓了越来越多的实际应用。虽然最初的光学频率梳由钛蓝宝石(Ti:Sapphire)和光纤激光为主导,但基于二极管激光泵浦的全固态激光器(Diode-Pumped Solid-State Lasers, DPSSL)的飞秒固态光频梳结合了上述两种光频梳技术的优势,已成为光频梳领域的一个重要分支。

DPSSL飞秒固态光频梳与钛宝石光频梳一样,可以无需外部放大直接输出高功率和低固有噪声的飞秒脉冲,又与光纤光频梳一样可以直接由激光二极管泵浦。由于用于泵浦的激光二极管(laser Diode, LD)体积小、效率高且成本低廉,使得DPSSL成为非常稳定可靠的激光源。此外,泵浦二极管可以通过其高带宽的注入电流直接调制,因此能够通过泵浦电流简单地控制或稳定载波包络相移频率 f_{ceo} ,避免了钛宝石光频梳结构复杂、成本高、泵浦效率低的缺点,也避免了光纤光频梳通常存在的重复频率低及单脉冲能量低的问题。本文基于全固态光频梳技术的特点和优势,对其发展和应用研究进行归纳总结,并介绍本科研团队的相关研究成果,最后分析和展望全固态光频梳技术未来的发展前景。

1 全固态飞秒光学频率梳的研究进展

2001年, Holzwarth 等人首次通过 $f-2f$ 方法在DPSSL中获得了40 dB的CEO信号^[3],当时使用的增益介质为Cr:LiSAF,基于克尔透镜锁模产生了重复频率为93 MHz、中心波长为894 nm、平均功率115 mW、脉冲持续时间约60 fs的脉冲输出。随着研究人员对全固态光频梳的进一步探索,波段处于1 μm 附近的掺Yb增益介质的优良特性逐渐获得重点关注。2008年, Stephanie A. Meyer 等人首次实现块状Yb:KYW激光器的CEO频率锁定^[4],为了获得相干性良好的超连续光谱,他们在腔外加入一级光纤放大器和压缩器,获得了平均功率为360 mW、脉宽为80 fs的脉冲激光,采用泵浦反馈方法实现CEO控制, f_{ceo} 的相位噪声为1.7 rad。2013年,该课题组实现了Yb:KYW激光器的频率全锁定^[5],结果如图1所示,在0.1 Hz~1 MHz范围内获得了300 mrad的残余积分相位噪声。

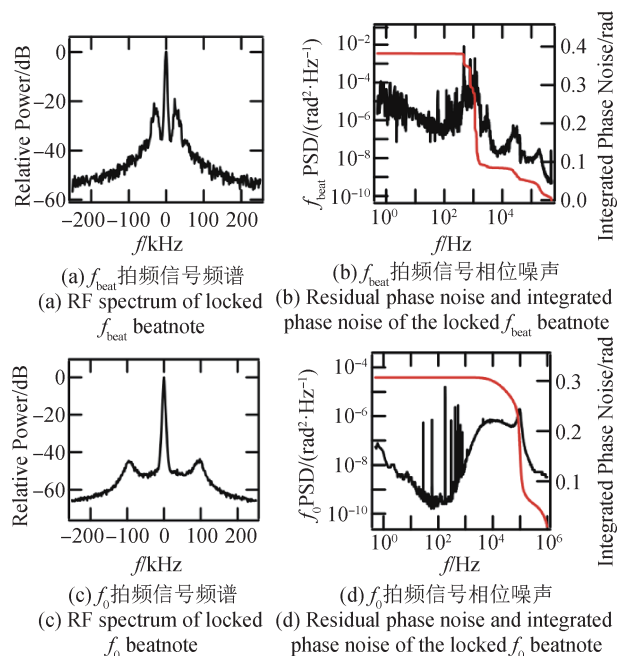


图1 全固态Yb:KYW光频梳的CEO锁定结果^[5]

Fig.1 Results of phase locked all-solid-state Yb:KYW optical frequency comb^[5]

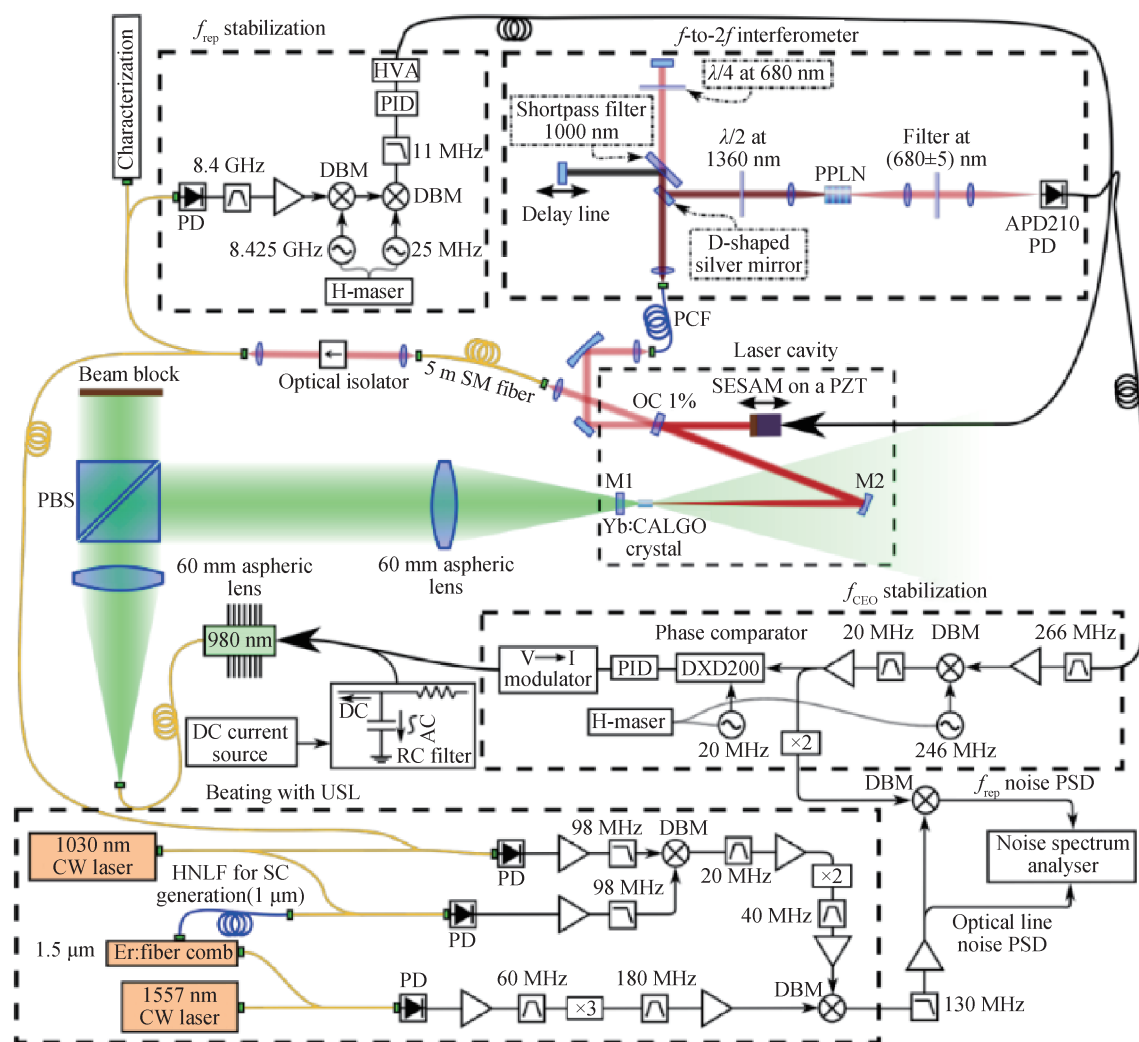
光频梳的重复频率是影响其应用的重要参数之一,更高的重复频率意味着在给定的平均功率下增加每个梳齿的功率,从而在各种应用中提高信噪比。然而随着重复频率的提升,脉冲能量下降,由半导体可饱和吸收镜(Semiconductor Satu-

able Absorber Mirror, SESAM) 方法锁模的固态光频梳容易出现不稳定的调 Q 锁模^[6], 后续的非线性过程也会更加困难。2011年, 瑞士联邦理工学院 Ursula keller 课题组使用 Yb: KGW 作为增益介质, 用波长为 980 nm、输出功率为 6 W 的分布式布拉格二极管激光器泵浦, 通过 SESAM 锁模在 1042 nm 波长附近实现了脉冲宽度为 290 fs、输出功率超过 2 W 的 1 GHz 锁模运转^[7]。如此宽的脉冲宽度在光子晶体光纤 (Photonics Crystal Fiber, PCF) 中会产生阶数很高的孤子分裂, 导致输出的超连续光谱相干性较差, 从而无法直接探测 CEO 信号, 针对此问题, 该课题组先用 1 m 长的光纤产生自相位调制 (Self-Phase Modulation, SPM) 对振荡器输出光谱进行展宽, 再配合 SP10 材料制作的棱镜将种子光脉冲压缩至约 100 fs 的脉宽, 光孤子的数量由原先的 13 个降低至 5 个, 最后再将其注入到长度为 2 m 的 PCF 中, 产生了相干优良、谱宽超过一个倍频程的超连续谱, 从而首次实现了对 GHz 重复频率 DPSSL 激光 CEO 频率的探测, 在 1 MHz 分辨率下, 得到 CEO 拍频信号的信噪比为 27 dB。该研究启发科研人员在固态光频梳的发展中除了追求千兆赫兹的重复频率之外, 还需要使飞秒脉冲具有更短的脉宽和较高的峰值功率。在此基础上, A. Klenner 等人于 2013 年通过对谐振腔的合理设计, 直接从 Yb: KGW 振荡器中获得了重复频率为 1.06 GHz、脉宽为 125 fs 的超短激光输出, 其平均功率为 3.4 W, 峰值功率达到了前所未有的 22.7 kW。将其注入长度为 1 m 的 PCF 中, 得到了高达 70% 的耦合效率。结合 $f-2f$ 自参考法, 测得的 CEO 拍频信号大于 30 dB (分辨率宽为 100 kHz), 为推动固态光频梳技术发展起到重要作用^[8]。

2014年, U. keller 课题组经过前期的努力, 终于率先实现了 1 GHz 重复频率 DPSSL 的 CEO 信号锁定^[9]。为了得到更窄的脉宽, 他们将增益介质由原来的 Yb: KGW 更换成具有更宽发射带宽的 Yb: CALGO, 采用“Z”字形腔体结构和 SESAM 锁模技术, 实现了平均输出功率为 1.7 W、中心波长为 1062 nm、重复频率达 1 GHz、脉冲宽度为 64 fs 的超短脉冲。在 1 Hz~5 MHz 的积分频率范围内, 经环外 $f-2f$ 干涉仪探测得到锁定后 f_{ceo} 的剩余相位噪

声为 744 mrad。2017年, 同课题组的 Thomas sudmeyer 等人使用 Yb: CALGO 块状激光器实现了 GHz 重复频率 DPSSL 的频率全锁定, 系统如图 2 所示。他们将振荡器直接输出的平均功率为 2.1 W、脉冲宽度仅 96 fs 的脉冲直接用于超连续产生, 没有经过任何放大和压缩, 在 10 kHz 分辨率带宽内检测到 CEO 的信噪比为 40 dB。进一步地, 在将重复频率 f_{rep} 与 f_{ceo} 信号和微波参考信号混频得到误差信号的基础上, 通过锁相环电路反馈控制光频梳的制动器, 实现了光频梳与微波参考源的锁定, 重复频率的稳定度达到了微波频率参考源的 10^{-12} 水平。由于没有了光纤放大器这一噪声源, CEO 的剩余相位积分噪声为 680 mrad^[10]。2020年, 他们又实现了 10 GHz 重复频率的 SESAM 锁模直腔 Yb: CALGO 飞秒激光器, 并测量得到 33 dB 的 CEO 信噪比^[11]。

输出光谱的带宽和波长范围也是光频梳的重要参数。掺 Yb 固态光频梳的中心波长主要在 1 μm 近红外波段, 以 Yb 和 Er 共掺杂玻璃为增益介质的光频梳的中心波长在 1.5 μm ^[12], 由于分子中原子的振动模式能量对应于 2~20 μm 的“分子指纹区”, 因此研究者们开始对中红外波段的光频梳展开深入研究。新型激光增益介质和非线性频率转换技术为产生中红外输出的固体光频梳起到了重要推动作用。过渡金属, 如铬或铁, 若掺杂到 II-VI 族化合物的晶体中, 会在中红外区域提供较宽的增益带宽。这些激光活性金属中的电子跃迁与主晶体晶格中的声子强烈耦合, 从而导致显著的均匀展宽, 通常超过中心频率的 30%。硫族化物主体如 ZnSe 和 ZnS 特别适用于这一过程, 因为它们支持这种“振动”耦合, 同时由于其最大声子能量较低, 即使在室温下也能充分抑制非辐射多声子弛豫, 这些特性使 Cr: ZnS/ZnSe 晶体成为直接产生中红外波段飞秒激光的优异材料, 被称为中红外的钛蓝宝石^[13]。成熟稳定的 Er, Tm 光纤泵浦激光器和增益介质的宽发射谱特性支持 Cr: ZnS/ZnSe 激光器能够实现百飞秒以下的少周期脉冲输出^[14-19]。国际上第一个全锁定的 Cr: ZnS 光学频率梳于 2019 年报道^[20], 其输出功率为 3.25 W, 重复频率为 80 MHz, 经过放大器的同时光谱也展宽到了一个倍频程。通过本征非线性干涉法直接在多

图2 全锁定 Yb:CALGO 频率梳装置示意图^[10]Fig.2 Overall scheme of the fully-stabilized Yb:CALGO GHz frequency comb^[10]

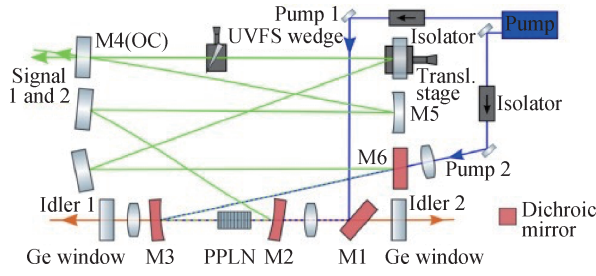
晶 Cr:ZnS 晶体内部获得 f_{ceo} 的光谱分量，将振荡器 CEO 的相位噪声控制在 75 mrad。2020 年，俄罗斯的研究团队报道了将实现的 Cr:ZnSe 飞秒锁模脉冲注入光子晶体光纤产生倍频程超连续光谱^[21]，实现了跨越 1.4~4.2 μm 的中红外超连续光谱。

利用非线性光学效应应将光谱从可见光或近红外域推进到中红外波段，可行的技术方案有光学参量振荡 (Optical Parametric Oscillation, OPO)、光学参量放大 (Optical Parametric Amplification, OPA)、差频 (Different Frequency Generation, DFG) 及超连续 (Supercontinuum, SC) 等。其中，通过同步泵浦光参量振荡器 (Optical Parametric Oscillator, OPO) 在中红外波段可以获得较高的输出功率、较宽的调谐范围和极低的强度噪声。如使用 Yb: KYW 激光频率梳泵浦 PPLN 晶体产生的中红外 OPO

的光谱范围可以覆盖 2.5~4.8 μm ^[22]；使用 2 μm 掺铈光纤光梳泵浦的 OPO 可以获得接近 10 μm 的长波中红外^[23]。U. Keller 课题组使用 Yb:CALGO 单腔双光梳作为泵浦源，通过光参振荡产生了平均功率超过 245 mW、调谐范围覆盖 3~5 μm 的中红外双光梳^[24]，实验装置如图 3 所示，他们在 1 MHz 以上的偏频处，获得了低至 -158 dBc/Hz 的相对强度噪声。通过将射频梳信号与连续光 (Continuous Wave, CW) 信号进行外差干涉，得到的射频梳线宽仅有 400 Hz，证明了全固态双光梳同步泵浦 OPO 的高功率与低噪声特性，为中红外双光梳光谱源提供了一个灵活简捷的新思路。

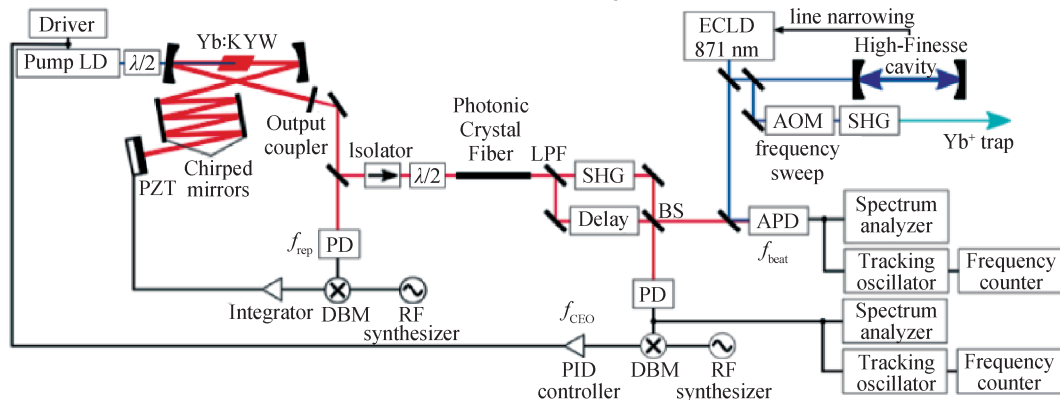
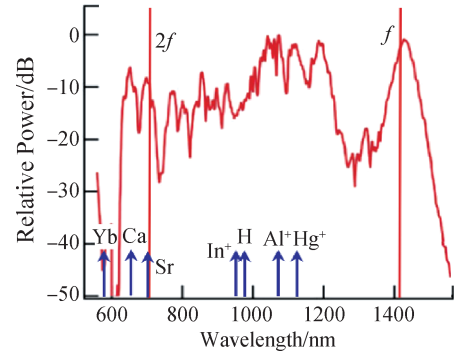
2 全固态飞秒光学频率梳的应用

光学频率梳最初被开发用于计算光学原子钟

图3 新型单腔双光梳泵浦的OPO光路图^[24]Fig.3 Schematic of the OPO cavity and its pumping^[24]

的周期^[25]，直接促进了光频计量学的进步，在过去二十年中取得了一系列重要进展。众所周知，目前世界对秒的定义基于原子钟，其载波处于微波频率范围，光频梳的发明可以使频率标准的载波提高到光学频率的范围，其频率稳定度可以提高 10^5 量级。基于全固态光频梳的光谱展宽技术，可直接覆盖Sr (698 nm)，Sr⁺ (674 nm)，Yb (578 nm) 和Ca (729 nm) 等光学时钟的波长（如图4所示）。通过非线性频率变换还可进一步覆盖Yb (467 nm 和 436 nm)，Hg (282 nm)，Al (267 nm) 和Hg (266 nm) 等光学时钟的基频光，这一优点使得全固态光频梳可以有效地应用于原子跃迁的绝对频率以及超精细原子态共振激发的测量。

作为全固态光频梳应用的一个典型例子，2018年Mitaki等人将基于克尔透镜锁模Yb: KYW激光器的光频梳应用于频率测量研究，如图5所示，其中 f_{rep} 和 f_{ceo} 分别锁定至射频参考源， f_{ceo} 的残余相位噪声为0.51 rad，在锁定时长为2 h、计数门时间为1 s时， f_{ceo} 长期频漂标准差为1 Hz^[26]。为了验证光频梳的光频测量性能，他们对¹³¹Yb⁺在²S_{1/2} ($F=0$) —²D_{3/2} ($F=2$) 之间的871 nm时钟激光信号

图5 克尔透镜锁模Yb: KYW光频梳及光频测量系统^[26]Fig.5 Schematic of the experimental setup of the f_{ceo} -stabilized octave-spanning optical frequency comb based on a soft-aperture Kerr-lens mode-locked Yb: KYW laser^[26]图4 通过光子晶体光纤展宽的倍频程超连续光谱及正在研究的各种光钟的波长^[5]Fig.4 Octave supercontinuum spectra broadened by photonic crystal fibers and wavelengths of various optical clocks under study^[5]

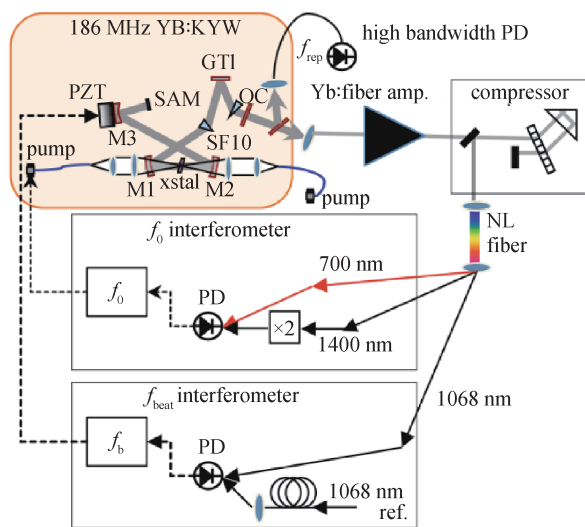
偏移进行了测量。通过测量¹³¹Yb⁺时钟激光与光频梳某一梳齿之间的拍频信号，最终得到高精度共振腔的线性频率漂移为-33(2) Hz/s。测量结果与¹³¹Yb⁺频率偏移的标准值高度吻合，从而证实了由二极管泵浦的Yb: KYW 固态光频梳能够长期稳定地进行光学频率的测量。

低噪声的微波频率在雷达、高速模数转换、长基线干涉仪以及大型仪器设备的远程同步等领域中具有重要应用价值^[27]，科研人员一直致力于发展稳定的低噪声微波信号源。相较传统的晶体振荡器方法，将固态光频梳技术和具有高 Q 值的光学腔相结合，能够产生极其稳定的微波信号^[28-30]。将光频梳信号锁定到光学参考 f_{opt} 时，有

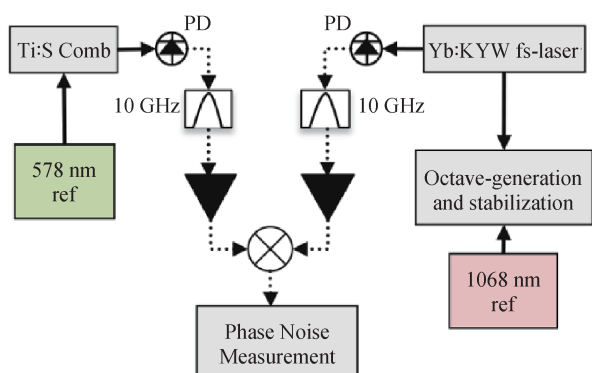
$$f_{\text{rep}} = \frac{f_N - f_{\text{ceo}}}{N} = \frac{f_{\text{opt}} - f_b - f_{\text{ceo}}}{N} \quad (1)$$

式中： f_N 为光频梳的第 N 个纵模频率； f_b 为光学参考 f_{opt} 与 f_N 之间的拍频信号。重复频率的 n 次谐波

$f_n = n f_{\text{rep}}$, 即为一个具有极高稳定性的微波信号。基于光学频率梳产生的微波信号的相位噪声是目前所有微波频率产生技术中最低的, 原因是微波频率信号的产生源自光频信号到微波频率的分频, 因此通过光频梳方法所产生的微波信号的相位噪声将大幅降低。例如当用光电探测器探测光梳重复频率的 n 次谐波时, 微波信号的相位噪声会相较于光频信号低 $(N/n)^2$ 倍。Meyer 等人将 Yb:KYW 固态光梳锁定到波长 1068 nm 的 Al^{3+} 光钟上, 如图 6 所示, 最终产生了 10 GHz 的低噪声微波频率信号^[5]。通过另一套独立的 Ti 蓝宝石光频梳对所产生的微波信号进行频率稳定性检测, 最终微波信号的相位噪声在 1 Hz 下达到了 -99 dBc/Hz, 对应于 1 s 下低至 2.6×10^{-15} 的艾伦方差。



(a) 锁定至光频的 Yb:KYW 固态光频梳示意图
(a) Schematic representation of Yb:KYW comb system



(b) 微波信号噪声检测系统示意图
(b) Schematic representation of microwave measurement PD photodiode

图 6 锁定至光频的 Yb:KYW 固态光频梳^[5]

Fig.6 Schematic representation of Yb:KYW solid-state optical comb locked to optical frequency^[5]

光学频率梳的高精度频率特性和宽带光谱特性使得精密光谱学与超快光学实现了完美的交叉融合, 基于光学频率梳的光谱测量可以实现梳线宽度量级的光谱分辨率。近年来, 双光梳光谱学因其超短的采集时间、极高的信噪比 (Signal-Noise Ratio, SNR)、高分辨率和高精度而备受关注^[31]。2022 年, U. Keller 等人在以 Yb:CALGO 作增益的 DPSSL 腔内, 以布鲁斯特角放置一对菲涅尔棱镜, 将腔模在空间分离^[32], 产生了平均功率大于 3 W、脉冲宽度低于 80 fs、重复率为 1.03 GHz 的双光梳系统, 两套双梳的重复频率差连续可调谐, 最高达 27 kHz。该系统兼具高输出功率、低噪声以及高采样速率等优点, 拓展了双梳光谱的应用范围, 单腔双梳的结构又使得整个光学系统简单且紧凑。千兆赫兹的重复频率能够在实现高灵敏度和快速测量的同时提供更高的分辨率, 使得双光梳系统能够在大气压环境下测量多种气体。基于这套系统, U. Keller 等人检测了长为 20 cm, 气压为 987 mbar 的乙炔气体电池, 得到的特征谱与标准值完全吻合。这种高功率单腔千兆赫兹双梳状固态激光器将成为许多领域中通用的工具, 包括从太赫兹到可见光谱范围的吸收光谱测量、非线性显微镜技术 (如受激拉曼散射) 和高精度激光测距等。

3 研究结果与展望

针对全固态光频梳的发展需求, 笔者所在的课题组在实现系列全固态飞秒激光的基础上, 于 2015 年利用自行设计搭建的掺镱硼酸钙钇钽 (Yb:YCOB) 飞秒激光在拉锥光纤中产生了跨倍频程的超连续光谱^[33]; 2016 年, 在国内率先实现了基于克尔透镜锁模的全固态激光频率梳, 由低噪声、高亮度的 976 nm 光纤激光器泵浦, 所用增益介质为 Yb:CYA 晶体, 中心波长位于 $1 \mu\text{m}$ 附近, 输出平均功率为 250 mW、脉冲宽度为 57 fs。将传统的 $f-2f$ 干涉仪改进成更稳定的单臂结构, 锁定后 CEO 的积分相位噪声 (1 Hz ~ 10 MHz) 仅为 316 mrad, 平均时间为 1 s 下的阿伦方差为 5.6×10^{-18} , 锁定记录时间大于 4 h, 相较同类型的光频梳, 长期稳定度提高了一个数量级^[34]。针对该激光输出平均功率较低的问题, 本课题组进一步开展了高平均功

率全固态 Yb:CfA 激光频率梳的研究,在获得平均输出功率 1.5 W 的基础上,采用光子晶体光纤将振荡器输出的激光光谱展宽至覆盖 700 ~ 1400 nm 的倍频程超连续。基于自参考 $f-2f$ 干涉技术,在 100 kHz 分辨率下测量得到信噪比为 40 dB 的自由运转 CEO 频率信号,基于泵浦反馈方法,实现了 CEO 频率的锁定,锁定后 f_{ceo} 的剩余相位抖动为 370 mrad。在锁定时长 3 h、计数门时间设置为 1 s 时, f_{ceo} 长期频率漂移标准差仅为 0.8 mHz。在 1 s 的平均时间下,锁定后 f_{ceo} 相对光学中心频率的阿伦方差为 2.9×10^{-18} 。采用压电陶瓷晶片 (Piezoelectric Ceramics, PZT) 控制腔长,实现了重复频率 13 次谐波的锁定,与同类 1 μm 波段的全固态光频梳相比,获得了最高的长期频率稳定性^[35]。此外,本课题组也采用前反馈方法对基于克尔透镜锁模的全固态 Yb:CfA 光频梳进行了 f_{ceo} 锁定^[36],通过反馈环内 CEO 拍频信号至腔外的声光移频器 (Acousto-Optic Frequency Shifter, AOFS),环外 f_{ceo} 被稳定地锁定在 60 MHz。通过测量相位噪声的功率密度谱,在 1 Hz ~ 1 MHz 范围内,积分相位噪声仅为 79.3 mrad, f_{ceo} 在 1 s 下的稳定度达到了 2.87×10^{-17} ,这也是首次报道的基于前反馈方法实现的 1 μm 波段全固态光频梳,为目前全固态光频梳所见报导的锁定 CEO 所达到的最低噪声,印证了前反馈方式在抗环境干扰和锁定状态重建方面的优势。图 7 所示为上述主要结果的实验数据及曲线。

以上介绍的全固态飞秒光梳都是使用块状晶体实现的实验成果。薄片激光器 (Thin Disk Laser, TDL) 也是目前 DPSSL 中备受关注的一类激光器,该激光器中所使用的增益晶体被加工成薄片结构,因此可以很好地得到均匀冷却。薄片激光器具有较高的光束质量和输出功率潜力,是用于光频梳的理想选择。2013 年, U. Keller 课题组报道了载波包络相位稳定的 Yb:CALGO 薄片激光器,其输出功率为 2.1 W、脉宽为 96 fs,在泵浦反馈方法控制下, CEO 的剩余相位噪声仅为 120 mrad^[37]。2018 年, Modsching 等人利用克尔透镜锁模的 Yb:Lu₂O₃ 薄片激光器直接产生了脉宽为 50 fs、输出功率为 4.4 W 的脉冲输出,利用泵浦反馈方法控制 CEO 后,剩余相位噪声为 197 mrad^[38]; 2019 年,德国马普所的 Oleg Pronin 等人报道了 CEO 稳定的

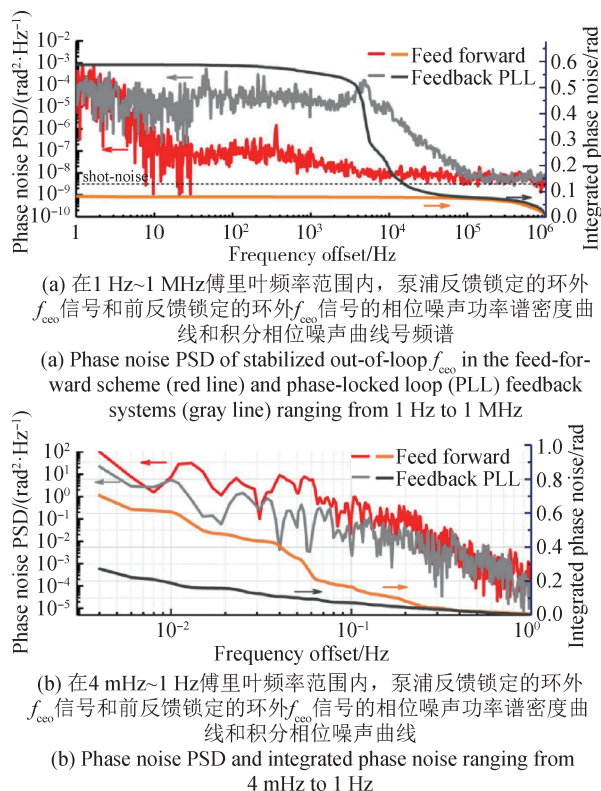


图 7 全固态 Yb:CfA 飞秒激光 CEO 频率前置反馈锁定结果^[36]

Fig.7 Results of all-solid-state Yb:CfA femtosecond OFC locked with feed-forward method^[36]

薄片 Yb:YAG 激光器,其脉宽为 190 fs,输出功率为 105 W,是目前所见报导报道的功率最高的薄片全固态光频梳^[39]。薄片激光器所展示出的高输出功率激光能力对于强场物理研究极具吸引力,但由于其技术复杂且成本较高,目前还鲜有全锁定的薄片激光器光频梳的相关报导。

全固态光频梳经过十余年的发展,在光谱范围、重复频率、输出功率、锁定精度和噪声方面均取得了突破性的进展,但是如何得到性能更好的光频梳光源,一直是重要研究课题。其中一个思路是用低噪声窄线宽的光纤激光器取代市面上常见的 LD 泵浦。目前全固态光梳大多使用功率较高、成本较低的半导体激光二极管泵浦,在 CEO 锁定时可以直接调制泵浦电流,改变注入到振荡器中的泵浦光功率,但是依然存在一些难以解决的问题。单模光纤耦合的激光二极管输出功率低,难以实现高功率的锁模输出,而全固态光梳中,常用的多模光纤耦合的激光二极管的泵源强度噪声和偏振噪声都比较高,不利于低噪声飞秒光频

梳的实现。限制 f_{ceo} 剩余相位噪声进一步降低的一个重要因素是环路带宽,对于泵浦反馈方法来说,锁相环路带宽往往取决于增益介质上的能级寿命。对于掺Yb介质来说,增益带宽只有数十kHz,使得高频相位噪声无法得到抑制,因此增加反馈环路带宽将是获得低噪声载波包络相位控制的重要挑战之一。针对这两个问题,如果使用光束质量好的光纤激光器作为泵源,在激光系统中加入声光调制器或电光调制器来控制泵浦功率,或许可以弥补当前DPSSL光频梳的功率限制和噪声限制。

此外,单腔双光梳激光器在近几年发展迅速,两个光梳共用相同的腔内光学器件,使噪声的影响显著降低,并且激光系统也更加简化。尽管单腔双光梳最早是在半导体激光器^[40]和光纤激光器^[41]中实现的,目前研究与应用最多的单腔双光梳也来自光纤激光技术,但由飞秒全固态振荡器发展起来的单腔双光梳有着得天独厚的优势,理论上只要增益介质是具有非各向同性增益特性的双折射晶体就能够实现^[42-47],其已成为当前全固态光频梳技术研究的重要方向。

参考文献

- [1] UDEM T, REICHERT J, HOLZWARTH R, et al. Accurate measurement of large optical frequency differences with a mode-locked laser [J/OL]. Optics letters, 1999, 24(13): 881. DOI:10.1364/OL.24.000881.
- [2] NIERING M, HOLZWARTH R, REICHERT J, et al. Measurement of the hydrogen 1 S - 2 S transition frequency by phase coherent comparison with a microwave cesium fountain clock [J/OL]. Physical review letters, 2000, 84(24): 5496-5499. DOI:10.1103/PhysRevLett.84.5496.
- [3] HOLZWARTH R, ZIMMERMANN M, UDEM T, et al. White-light frequency comb generation with a diode-pumped Cr:LiSAF laser[J/OL]. Optics letters, 2001, 26(17): 1376. DOI:10.1364/OL.26.001376.
- [4] MEYER S A, SQUIER J A, DIDDAMS S A. Diode-pumped Yb:KYW femtosecond laser frequency comb with stabilized carrier-envelope offset frequency [J/OL]. The European physical journal D, 2008, 48(1): 19-26. DOI:10.1140/epjd/e2008-00012-8.
- [5] MEYER S A, FORTIER T M, LECOMTE S, et al. A frequency-stabilized Yb: KYW femtosecond laser frequency comb and its application to low-phase-noise microwave generation[J/OL]. Applied physics B, 2013, 112(4): 565-570. DOI:10.1007/s00340-013-5439-9.
- [6] HÖNNINGER C, PASCHOTTA R, MORIER-GENOUD F, et al. Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking [J/OL]. Journal of the optical society of America B, 1999, 16(1): 46. DOI: 10.1364/JOSAB.16.000046.
- [7] PEKAREK S, SÜDMEYER T, LECOMTE S, et al. Self-referenceable frequency comb from a gigahertz diode-pumped solid-state laser [J/OL]. Optics express, 2011, 19(17): 16491. DOI:10.1364/OE.19.016491.
- [8] KLENNER A, GOLLING M, KELLER U. A gigahertz multimode-diode-pumped Yb: KGW enables a strong frequency comb offset beat signal [J/OL]. Optics express, 2013, 21(8): 10351. DOI:10.1364/OE.21.010351.
- [9] KLENNER A, SCHILT S, SÜDMEYER T, et al. Gigahertz frequency comb from a diode-pumped solid-state laser [J/OL]. Optics express, 2014, 22(25): 31008. DOI: 10.1364/OE.22.031008.
- [10] HAKOBYAN S, WITTEW V J, BROCHARD P, et al. Full stabilization and characterization of an optical frequency comb from a diode-pumped solid-state laser with GHz repetition rate [J/OL]. Optics express, 2017, 25(17): 20437. DOI:10.1364/OE.25.020437.
- [11] KRÜGER L M, MAYER A S, OKAWACHI Y, et al. Performance scaling of a 10-GHz solid-state laser enabling self-referenced CEO frequency detection without amplification [J/OL]. Optics express, 2020, 28(9): 12755. DOI:10.1364/OE.391252.
- [12] SCHILT S, BUCALOVIC N, DOLGOVSKIY V, et al. Fully stabilized optical frequency comb with sub-radian CEO phase noise from a SESAM-modelocked 15- μm solid-state laser [J/OL]. Optics express, 2011, 19(24): 24171. DOI:10.1364/OE.19.024171.
- [13] MIROV S, FEDOROV V, MOSKALEV I, et al. Progress in Cr²⁺ and Fe²⁺ doped mid-IR laser materials [J/OL]. Laser & photonics reviews, 2010, 4(1): 21-41. DOI: 10.1002/lpor.200810076.
- [14] TOLSTIK N, SOROKIN E, SOROKINA I T. Watt-level Kerr-lens mode-locked Cr: ZnS laser at 2.4 μm [C/OL]// CLEO: 2013. San Jose, California: OSA, 2013: CTh1H. 2 [2022-11-06]. https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=CLEO_SI-2013-CTh1H.2. DOI: 10.1364/CLEO_SI.2013.CTh1H.2.
- [15] VASILYEV S, MOSKALEV I, MIROV M, et al. Kerr-lens mode-locked middle IR polycrystalline Cr: ZnS Laser

- with a repetition rate 1.2 GHz [C/OL] // Lasers Congress 2016 (ASSL, LSC, LAC). Boston, Massachusetts: OSA, 2016: AW1A. 2 [2022-11-06]. <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=ASSL-2016-AW1A.2>. DOI: 10.1364/ASSL.2016.AW1A.2.
- [16] DIDDAMS S, MA L, YE J, et al. Broadband optical frequency comb generation with a phase-modulated parametric oscillator [J/OL]. // Optics letters: Vol. 24. 2010, Massachusetts AVE NW, Washington, DC 20036 USA: Optical SOC AMER, 1999: 1747-1749. DOI: 10.1364/OL.24.001747.
- [17] NAGL N, GROBMEYER S, POTZLBERGER M, et al. Directly diode-pumped few-optical-cycle Cr: ZnS laser at 800 mW of average power [C/OL] // Conference on Lasers and Electro-Optics. Washington, DC: Optica Publishing Group, 2020: SF3H. 5 [2022-11-06]. https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=CLEO_SI-2020-SF3H.5. DOI: 10.1364/CLEO_SI.2020.SF3H.5.
- [18] VASILYEV S, MOSKALEV I, SMOLSKI V, et al. Kerr-lens mode-locked Cr: ZnS oscillator reaches the spectral span of an optical octave [J/OL]. Optics express, 2021, 29(2): 2458. DOI: 10.1364/OE.411984.
- [19] BARH A, HEIDRICH J, ALAYDIN B O, et al. Watt-level and sub-100-fs self-starting mode-locked 2.4- μm Cr: ZnS oscillator enabled by GaSb-SESAMs [J/OL]. Optics express, 2021, 29(4): 5934. DOI: 10.1364/OE.416894.
- [20] VASILYEV S, SMOLSKI V, PEPPERS J, et al. Middle-IR frequency comb based on Cr: ZnS laser [J/OL]. Optics express, 2019, 27(24): 35079. DOI: 10.1364/OE.27.035079.
- [21] LEONOV S O, WANG Y, SHIRYAEV V S, et al. Coherent mid-infrared supercontinuum generation in tapered suspended-core $\text{As}_{39}\text{Se}_{61}$ fibers pumped by a few-optical-cycle Cr: ZnSe laser [J/OL]. Optics letters, 2020, 45(6): 1346. DOI: 10.1364/OL.386429.
- [22] ZHANG Z, GARDINER T, REID D T. Mid-infrared dual-comb spectroscopy with an optical parametric oscillator [J/OL]. Optics letters, 2013, 38(16): 3148. DOI: 10.1364/OL.38.003148.
- [23] IWAKUNI K, PORAT G, BUI T Q, et al. Phase-stabilized 100 mW frequency comb near 10 μm [J/OL]. Applied physics B, 2018, 124(7): 128. DOI: 10.1007/s00340-018-6996-8.
- [24] BAUER C P, CAMENZIND S L, PUPEIKIS J, et al. Dual-comb optical parametric oscillator in the mid-infrared based on a single free-running cavity [J/OL]. Optics express, 2022, 30(11): 19904. DOI: 10.1364/OE.459305.
- [25] MA L S, ZUCCO M, PICARD S, et al. A new method to determine the absolute mode number of a mode-locked femtosecond-laser comb used for absolute optical frequency measurements [J/OL]. IEEE journal of selected topics in quantum electronics, 2003, 9(4): 1066-1071. DOI: 10.1109/JSTQE.2003.819102.
- [26] MITAKI M, SUGIYAMA K, KITANO M. Octave-spanning optical frequency comb based on a laser-diode pumped Kerr-lens mode-locked Yb: KYW laser for optical frequency measurement [J/OL]. Applied optics, 2018, 57(18): 5150. DOI: 10.1364/AO.57.005150.
- [27] KIM J, COX J A, CHEN J, et al. Drift-free femtosecond timing synchronization of remote optical and microwave sources [J/OL]. Nature photonics, 2008, 2(12): 733-736. DOI: 10.1038/nphoton.2008.225.
- [28] BARTELS A, DIDDAMS S A, OATES C W, et al. Femtosecond-laser-based synthesis of ultrastable microwave signals from optical frequency references [J/OL]. Optics letters, 2005, 30(6): 667. DOI: 10.1364/OL.30.000667.
- [29] JUNG K, KIM J. Subfemtosecond synchronization of microwave oscillators with mode-locked Er-fiber lasers [J/OL]. Optics letters, 2012, 37(14): 2958. DOI: 10.1364/OL.37.002958.
- [30] FORTIER T M, QUINLAN F, HATI A, et al. Photonic microwave generation with high-power photodiodes [J/OL]. Optics letters, 2013, 38(10): 1712. DOI: 10.1364/OL.38.001712.
- [31] KEILMANN F, GOHLE C, HOLZWARTH R. Time-domain mid-infrared frequency-comb spectrometer [J/OL]. // Optics letters: Vol. 29. 2010, Massachusetts AVE NW, Washington, DC 20036 USA: Optical SOC AMER, 2004: 1542-1544. DOI: 10.1364/OL.29.001542.
- [32] PHILLIPS C R, WILLENBERG B, NUSSBAUM-LAPPING A, et al. [M/OL]. arXiv, 2022 [2022-11-09]. <http://arxiv.org/abs/2211.01368>.
- [33] JIA Y L, ZHU Z, HAN H N, et al. Generation of octave-spanning super-continuum in tapered single mode fibre pumped by femtosecond Yb: YCOB laser [J/OL]. Acta physica sinica, 2015, 64(5): 54206. DOI: 10.7498/aps.64.054206.
- [34] YU Z, HAN H, XIE Y, et al. CEO stabilized frequency comb from a 1- μm Kerr-lens mode-locked bulk Yb: CYA

- laser[J/OL]. Optics express, 2016, 24(3): 3103. DOI: 10.1364/OE.24.003103.
- [35] ZHANG Z, HAN H, TIAN W, et al. A fully stabilized low-phase-noise Kerr-lens mode-locked Yb:CYA laser frequency comb with an average power of 1.5 W[J/OL]. Applied physics B, 2020, 126(8): 134. DOI: 10.1007/s00340-020-07485-6.
- [36] ZHANG Z, HAN H, WANG H, et al. Ultra-low-noise carrier-envelope phase stabilization of a Kerr-lens mode-locked Yb:CYA laser frequency comb with a feed-forward method[J/OL]. Optics letters, 2019, 44(22): 5489. DOI: 10.1364/OL.44.005489.
- [37] KLENNER A, EMAURY F, SCHRIEBER C, et al. Phase-stabilization of the carrier-envelope-offset frequency of a SESAM modelocked thin disk laser[J/OL]. Optics express, 2013, 21(21): 24770. DOI: 10.1364/OE.21.024770.
- [38] MODSCHING N, PARADIS C, BROCHARD P, et al. Carrier-envelope offset frequency stabilization of a thin-disk laser oscillator operating in the strongly self-phase modulation broadened regime[J/OL]. Optics express, 2018, 26(22): 28461. DOI: 10.1364/OE.26.028461.
- [39] GRÖBMEYER S, BRONS J, SEIDEL M, et al. Carrier-envelope-offset frequency stable 100 W-level femtosecond thin-disk oscillator[J/OL]. Laser & photonics reviews, 2019, 13(3): 1800256. DOI: 10.1002/lpor.201800256.
- [40] LINK S M, KLENNER A, MANGOLD M, et al. Dual-comb modelocked laser[J/OL]. Optics express, 2015, 23(5): 5521. DOI: 10.1364/OE.23.005521.
- [41] MEHRAVAR S, NORWOOD R A, PEYGHAMBARIAN N, et al. Real-time dual-comb spectroscopy with a free-running bidirectionally mode-locked fiber laser[J/OL]. Applied physics letters, 2016, 108(23): 231104. DOI: 10.1063/1.4953400.
- [42] IDEGUCHI T, NAKAMURA T, KOBAYASHI Y, et al. Bidirectional Kerr-lens mode-locked dual-comb ring laser[C/OL]// Conference on Lasers and Electro-Optics. San Jose, California: OSA, 2016: SW1H.6[2022-11-17]. https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=CLEO_SI-2016-SW1H.6. DOI: 10.1364/CLEO_SI.2016.SW1H.6.
- [43] WILLENBERG B, PUPEIKIS J, KRÜGER L M, et al. Femtosecond dual-comb Yb:CaF₂ laser from a single free-running polarization-multiplexed cavity for optical sampling applications[J/OL]. Optics express, 2020, 28(20): 30275. DOI: 10.1364/OE.403072.
- [44] PUPEIKIS J, WILLENBERG B, BRUNO F, et al. Pico-second ultrasonics with a free-running dual-comb laser[J/OL]. Optics express, 2021, 29(22): 35735. DOI: 10.1364/OE.440856.
- [45] KOWALCZYK M, STERCZEWSKI Ł, ZHANG X, et al. Dual-Comb femtosecond solid-state laser with inherent polarization-multiplexing[J/OL]. Laser & photonics reviews, 2021, 15(8): 2000441. DOI: 10.1002/lpor.202000441.
- [46] MODSCHING N, DRS J, BROCHARD P, et al. High-power dual-comb thin-disk laser oscillator for fast high-resolution spectroscopy[J/OL]. Optics express, 2021, 29(10): 15104. DOI: 10.1364/OE.424317.
- [47] CAMENZIND S L, KOENEN D, WILLENBERG B, et al. Timing jitter characterization of free-running dual-comb laser with sub-attosecond resolution using optical heterodyne detection[J/OL]. Optics express, 2022, 30(4): 5075. DOI: 10.1364/OE.448274.

(本文编辑:刘圣晨)



第一作者: 马骏逸 (1997—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为超快激光技术和光学频率梳。



通讯作者: 韩海年 (1974—), 女, 副研究员, 博士, 主要研究方向为超快激光技术和光学频率梳。



通讯作者: 魏志义 (1963—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为超短超强激光物理与技术。