

文章编号: 1005-5630(2022)04-0081-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2022.004.011

重复频率锁定的 783 nm 飞秒光纤激光器研制

郭 旭, 汤 成, 王嫣鸾, 郝 强

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 设计并搭建了重复频率长时精确锁定的 783 nm 飞秒光纤激光器。该激光器基于全保偏非线性干涉环镜 (NALM), 实现掺铒光纤振荡器锁模脉冲输出, 由与脉冲分离器级联的环境稳定掺铒光纤双级放大器进行功率放大, 实现了平均功率 1.30 W、脉冲宽度 130 fs、重复频率 77.1 MHz、1560 nm 脉冲输出; 通过周期极化铌酸锂 (PPLN) 光学晶体倍频, 获得了平均功率为 0.52 W、脉冲宽度为 140 fs、783 nm 脉冲输出。通过重复频率监测及锁相环技术, 进一步将掺铒光纤振荡器的重复频率溯源至参考铷原子钟, 12 h 内频率抖动峰-峰值为 5 mHz、标准偏差为 1.2 mHz。该激光器系统具有稳定性高、集成度高、体积小等特点。

关键词: 激光器; 掺铒光纤激光器; 分离脉冲放大; 锁定重复频率

中图分类号: TN 249 **文献标志码:** A

Development of a 783 nm femtosecond fiber laser with repetition frequency locking

GUO Xu, TANG Cheng, WANG Yanluan, HAO Qiang

(School of Optical-Electrical Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A 783 nm femtosecond fiber laser with long repetition rate was designed and constructed. The laser was based on the amplifying loop mirror mode-locked erbium-doped fiber oscillator and the environment-stable erbium-doped fiber double-stage amplifier cascaded by pulse separator. An average power of 1.3 W, pulse width of 130 fs, repetition rate of 77.1 MHz, and 1560 nm pulse output are achieved. By frequency doubling using periodically poled lithium-niobate, an average power of 0.5 W, a pulse width of 140 fs and a pulse output of 783 nm were obtained. Furthermore, the repetition frequency of erbium-doped fiber oscillator was traced to the rubidium atomic clock by repetition frequency monitoring and phase-locked loop technology. The peak value of frequency jitter is 5 mHz and the standard deviation is 1.2 mHz within 12 hours. The laser system has the characteristics of high stability, high integration and small volume.

Keywords: laser; erbium-doped fiber laser; divided-pulse amplification; phase locking

收稿日期: 2022-01-22

基金项目: 国家重点研发项目计划(2018YFB0407100); 国家自然科学基金委重大科学仪器项目研发(11727812)

作者简介: 郭 旭(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为掺铒光纤光梳。E-mail: 193720556@usst.usst.edu.cn

通信作者: 郝 强(1981—), 男, 副教授, 研究方向为超快激光技术。E-mail: qianghao@usst.edu.cn

引 言

780 nm 波段飞秒脉冲激光在太赫兹光学、生物光子学、时间频率标准等领域得到了广泛的应用^[1-4]。780 nm 波段超短脉冲通常采用钛宝石激光器产生^[5]，其光路为空间结构，且对泵浦源的稳定性和噪声抑制水平要求极高，这在一定程度上限制了其应用推广。光纤激光器因其高稳定性、高性价比和小型化等特点，已经在某些领域逐渐取代全固态激光器^[6]。重复频率锁定的光纤激光器以及光纤光学频率梳在微波信号合成^[7-8]、光学原子钟^[9-10]等领域得到不断拓展。其中，获得光学频率梳的关键步骤是重复频率(f_r)和载波包络相位(f_0)的锁定。考虑到 f_0 的探测与锁定较为困难，且在某些特定场景中，例如双光梳光谱^[11-12]等应用中，只需锁定重复频率 f_r 即可，发展重复频率精确锁定 780 nm 的高稳定性飞秒光源具有重要意义。

目前，实现激光器重复频率锁定方法主要有两种：一种是改变激光器谐振腔的几何长度，可以通过压电陶瓷(piezoelectric ceramic transducer, PZT)的拉伸带动光纤长度的改变来实现；另一种是采用控制激光器的光纤折射率，以此改变光程。2013 年，Rieger 等^[13]采用共振增强式非线性折射率调制技术，在腔内分别加入波分复用器及一段掺杂光纤。该掺杂光纤上的抽运光强度的不同会改变该段光纤的非线性折射率，以此实现对掺铒激光器重复频率进行锁定。频率锁定的标准偏差为 22 mHz。该技术由于需要实时反馈抽运光强度来改变光纤的非线性折射率，使得激光器输出脉冲的平均功率产生波动，不能满足实际应用需求。此外，该掺杂光纤的加入直接增加激光器的几何腔长，也限制了激光器重复频率的进一步提升。2015 年，Shen 等^[14]在非线性偏振旋转锁模激光器中引入一个电控偏振控制器，通过可控应力挤压改变光纤的双折射，实现重复频率标准偏差为 1.4 mHz 的精确锁定。但是，由于该腔型结构设计采用的是非保偏光纤，易受到外部振动及环境温度变化的影响，锁模状态和锁定状态的稳定性欠佳。2017 年，王少峰等^[15]基于

可饱和吸收体(semiconductor saturable absorber mirror, SESAM)实现锁模脉冲输出，将谐振腔的一部分光纤通过胶水固定于 PZT 上，通过 PZT 伸缩来拉伸光纤长度，重复频率锁定后的波动范围小于 3 mHz。虽然，SESAM 锁模的激光器结构设计简单，但是可饱和吸收体的可靠性较差，锁模器件长期工作容易产生不可逆转的光致损伤。此外，光纤在频繁应力拉伸的状态下容易产生疲劳，锁定精度会显著降低。

本文所提出的激光器基于全保偏非线性干涉环境(nonlinear amplifying loop mirror, NALM)原理实现了锁模脉冲振荡器的长期稳定工作，采用 PZT 结合步进电机的方式实现了长时高精度重复频率锁定，12 h 的锁定精度为 5 mHz。振荡器输出的低能量脉冲通过分离脉冲光纤放大器和周期极化铌酸锂(PPLN)晶体倍频技术，实现了脉冲宽度 140 fs 的超短脉冲输出。最终实现了一款中心波长为 783 nm 的锁定重复频率的激光器样机设计。

1 实验装置

激光器的谐振腔采用了 NALM 锁模原理，这种锁模方式是一种基于 Sagnac 干涉环结构的类可饱和吸收体锁模。一束光被分为传输方向相反的两束光在光纤环中传播时，这两束光由于脉冲不同强度部分累积的非线性相位差，从而在中央耦合器处表现出不同的透射效率。虽然两个方向脉冲走过的光程一样，但因为传播方向相反的两束光先后经过增益光纤，导致了累计的相位差也不同。当两束光相位差接近 π 时，耦合器对这部分能量表现出最高的透射率，经耦合器透射而出，而其余能量则被反射回光路中，继续进行着前一过程。经过无数次的循环后，谐振腔内的光最终被不断窄化为输出稳定的锁模脉冲。

锁相环系统是实现重复频率精密锁定的关键，该系统由三部分组成，分别是鉴相器、环路滤波器和压控振荡器。当鉴相器将内部振荡信号和外部参考信号的误差信号转换为电压信号时，会经过环路滤波器滤除掉一些高频信号和噪声信号，并反馈给压控振荡器。压控振荡器随着误差信号的变化，实时调控输出频率，使之不断地靠

近参考频率,直至两个频率一致且保持固定的相位差,从而实现自动跟随。

图1为实验装置示意图:激光二极管(laser diodes, LD),其输出波长为976 nm;980/1550 nm波分复用器(wavelength division multiplexing, WDM);Er为掺铒增益光纤(Er 80-4/125-PM, Liekki);光纤耦合器(coupler, OC),其分束比为4:6;FM为全反射镜;非互易性相移器(phasor, PS);准直器(collimator, COL)焦距为10 cm;1550 nm的半波片(half wave plate, HWP);ISO为光隔离器;PIN管为光电二极管;光纤偏

振分束器(fiber polarization beam splitter, F-PBS);法拉第旋转镜(faraday rotator mirror, FRM);PBS为偏振分束晶体;Divider为脉冲分离装置;L为聚焦透镜;PPLN为周期极化铌酸锂晶体;Rb为输出10 MHz模拟信号的铷原子钟;任意信号发生器(direct digital synthesis, DDS);MIXER为混频器;低通滤波器(low-pass filter, LPF)带宽为30 KHz;HIV为驱动PZT提供高电压放大;PZT为压电陶瓷促动系统。光源主要由谐振腔(a)、一级预放大(b)、倍频系统(c)、分离脉冲放大系统(d)和锁相环电路构成。

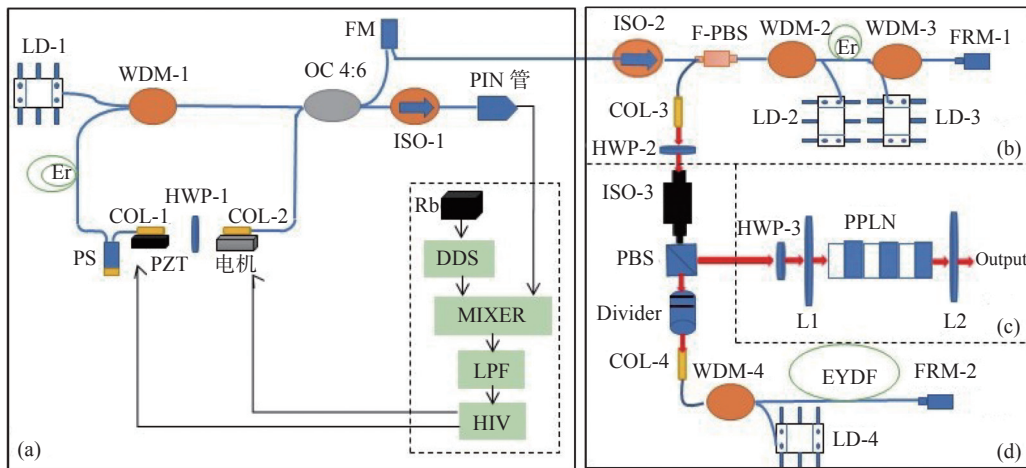


图1 实验装置图

Fig. 1 The experiment setup

2 783 nm 飞秒脉冲产生

飞秒脉冲谐振腔采用NALM锁模原理,实现了被动锁模。当锁模脉冲稳定输出时,泵浦光的最低阈值为120 mW,从FM的输出端口可获得平均功率1.5 mW,重复频率77.1 MHz的脉冲输出。图2(a)和2(b)分别显示了振荡器的输出光谱和自相关曲线,中心波长为1565 nm,光谱宽度约为6 nm,脉冲宽度为1.2 ps。在振荡器和后续光路之间插入一支光纤隔离器(ISO)是为了防止回返光影响振荡器的锁模状态。

种子脉冲从F-PBS的输入端口进入光纤预放大器,对功率进行初步提升。光纤预放大器采用双通放大、双向泵浦的工作方式。该预放大器采用非保偏单模光纤作为传输和增益介质。种子脉冲经过首次放大,由FRM反射后偏振方向旋转90°,随后第二次经过光纤预放大器,最后从

F-PBS另一端输出。该双通放大器不仅可以有效的抑制自发辐射,还可以有效抵抗外界环境的干扰,以非保偏光纤实现了保偏光纤放大器的稳定性,性价比好。种子脉冲的平均功率经过光纤预放大器后被提升至60 mW。

在图1(d)分离脉冲主放大器中,因为偏振分束器和脉冲分离装置都为空间结构,所以将光纤输出的脉冲准直为空间光。空间光由准直器Col3进行准直后,依次经过半波片HWP-2和光隔离器ISO-3。旋转半波片HWP-2用于调整种子脉冲的偏振状态,使通过光隔离器ISO-3的平均功率达最优。对于偏振分束器PBS,其一方面可以改善入射脉冲的偏振对比度,使得进入脉冲分离器的是水平偏振分量,另一方面可将主放大器的输出脉冲的竖直偏振输出。最后的环节是脉冲分离装置Divider。采用掺铒双包层光纤可有效的将1.56 μm波段的超短脉冲的平均功率提

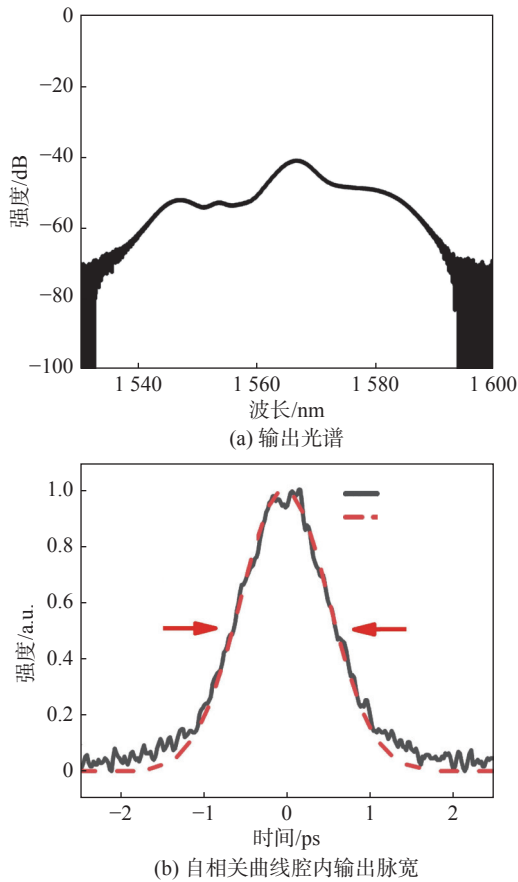


图 2 振荡器的输出参数

Fig. 2 Output characters of the laser oscillator

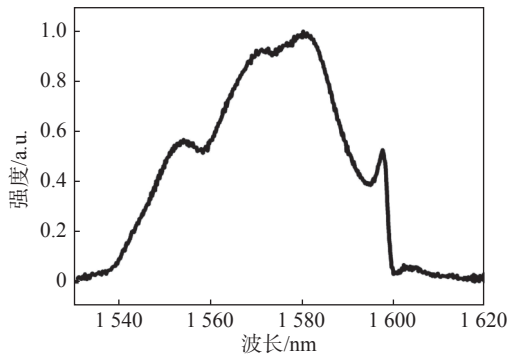
升至瓦量级。当超短脉冲在纤芯直径约为 $10\ \mu\text{m}$ 光纤中传播时,非线性效应和放大自发辐射是产生高对比、低噪声超短脉冲的限制因素。与啁啾脉冲放大相比,分离脉冲放大通过将一个脉冲在时域上分离成若干个子脉冲,可有效降低掺铒光纤放大器中的单脉冲能量,有效管理光纤放大器中的非线性效应^[16]。脉冲分离装置中采用 $\times 64$ 脉冲分离器进行脉冲分离,该脉冲分离器采用三级硫酸钆晶体和三级 PBS 晶体相组合方式^[17]。当种子脉冲入射到第一级硫酸钆晶体(该硫酸钆晶体光轴与水平方向的夹角为 45°)时,沿快、慢轴传播的两个脉冲在双折射效应的作用下产生一定时间延迟,延迟大小取决于该块硫酸钆晶体的长度。第二级硫酸钆的光轴为水平方向,即可将由第一级硫酸钆晶体输出的 2 个脉冲分离成 4 个子脉冲。第三级硫酸钆晶体的光轴与第一级硫酸钆晶体的光轴平行,可将第二级硫酸钆晶体输出的 4 个脉冲分离成 8 个子脉冲。其中,第一、第

二、第三级的硫酸钆晶体长度分别为 10、20 和 40 mm,对应子脉冲的延时量分别为 7、14 和 28 ps。这 8 个子脉冲经过随后的三级 PBS 分束器即可分离成 64 个子脉冲。该三级 PBS 分束器的底面与水平方向的夹角依次分别为 0° 、 45° 和 0° 。第一、第二、第三级 PBS 分束立方所产生的延时量分别为 150、300 和 600 ps。综上,1 个种子脉冲共分为 64 个子脉冲。同样地,光纤主放大器与光纤预放大器采用了类似双通结构。当子脉冲经光纤主放大器放大,由 FRM 反射后,偏振态发生旋转 90° ,返回的子脉冲再次经过光纤主放大器进行第二次放大,最终由脉冲分离器逆向合成 1 个脉冲。通过优化泵浦功率和光纤长度,可以有效管理主放大器的非线性效应和净色散,以产生平均功率为瓦量级的百飞秒脉冲。图 3(a)和 3(b)分别显示了主放大级输出脉冲的光谱,中心波长为 1570 nm 和自相关曲线,脉冲宽度 130 fs,此时,脉冲的平均功率提升至 1.3 W。

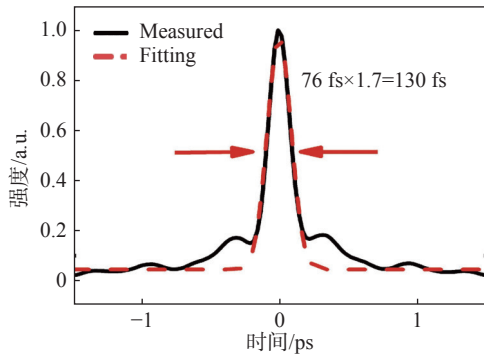
掺铒光纤放大器输出脉冲的倍频装置如图 1(c)倍频装置所示,其利用半波片 HWP-3 调节输出脉冲的偏振态,再经聚焦透镜($f=8\ \text{mm}$)聚焦在周期极化 PPLN 晶体上。该 PPLN 的反转周期为 $20.9\ \mu\text{m}$,尺寸为 $10.3\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}$ 。最后,倍频后的脉冲由一个焦距为 8 mm 的聚焦透镜准直输出。当入射光平均功率为 1.3 W 时,倍频光输出功率可达 520 mW,相应的转换效率 40.0%,输出光谱和脉冲宽度如图 3(c)、(d)所示。采用 CCD 在聚焦透镜 L2 后的 1 m 处测量倍频光光斑,如图 4(a)中插图所示,光斑圆度为 99%。图 4(a)显示 783 nm 飞秒脉冲的功率稳定性,峰-峰值的功率抖动为 18 mW,标准偏差为 2.21 mW。

3 重复频率锁定

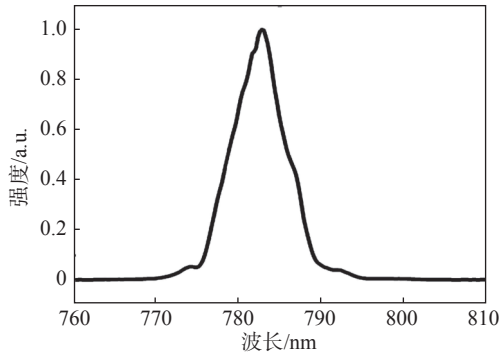
在自由运转状态下,激光器的重复频率会随着外界环境的改变而发生漂移,比如温度、湿度、振动等。可通过放置隔振泡沫和主动温度控制减弱外界环境对激光器重复频率的影响。通过对锁模激光器的振荡器进行隔振和绝热封装,以及半导体制冷片对锁模激光器的光路部分进行温



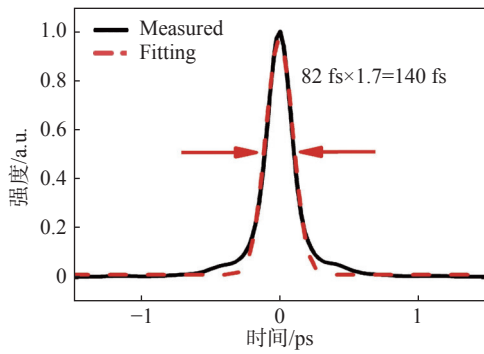
(a) 光纤主放大器输出光谱



(b) 光纤主放大器输出自相关曲线



(c) 倍频光光谱



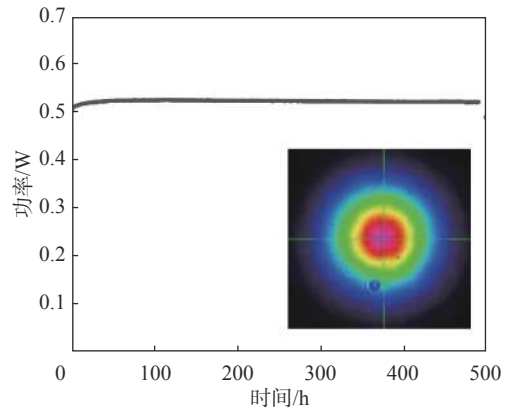
(d) 倍频光自相关曲线

图 3 光纤主放大器和倍频后的脉冲光谱和自相关曲线

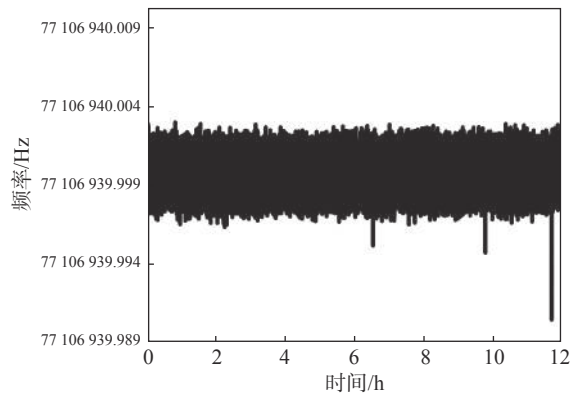
Fig. 3 The characters of pulse from main-amplifier and SHG

度控制。

为了实现锁模振荡器的重复频率长期高精度



(a) 输出功率稳定性及光斑 (插图)



(b) 12 h 的重频稳定性

图 4 功率及重频稳定性

Fig. 4 Power and repetition stability

锁定, 将振荡器内部的一对准直器 Col-1 和 Col-2 分别安装于两个位移平台上。其中一个位移平台为压电位移平台, 内部安装有 PZT 以精确控制 Col-1 的位移, PZT 的最大行程 100 μm , 最小步进 7 nm, 可实现最大约 3 kHz 的重复频率调谐; 另一位移平台是电控位移平台, 最大行程 25.4 mm。通过反馈控制 PZT 可实现对 Col-1 位置的精确控制, 进而精密调节锁模振荡器的几何腔长。当由于环境变化使得激光器重复频率漂移超过 PZT 的最大控制范围时, 可通过步进电机的大范围快速移动来粗调激光器的几何腔长, 弥补 PZT 伸缩量的不足, 以此实现对锁模振荡器重复频率的长期精密锁定。两个准直器之间的一个半波片 HWP-1 用于准确调节腔内脉冲的偏振状态, 确保脉冲沿着保偏光纤的慢轴传输。

在锁相电路中, 我们首先利用混频器将 PIN 管探测到的重复频率信号与参考信号 Rb 原子钟 (FE-5650 A) 进行混频, 产生误差信号。该误差信号通过低通滤波器 LPF 及相应的处理电

路将误差信号中的高频信号和噪声信号滤除。放大后的误差信号分为两路，分别连接至 PZT 和电控位移平台。通过 FPGA 对 PZT 和电控位移平台进行联合控制。图 4(b)显示了 12 h 的重复频率锁定情况，重复频率峰-峰值抖动小于 ± 5 mHz，标准偏差 1.2 mHz。期间，仅出现 3 次频率抖动超过 5 mHz 的情况。

4 结 论

综上所述，本文所提出的激光器系统谐振腔的脉冲光中心波长为 1570 nm；输出功率 1.30 W；脉冲宽度 130 fs。经过倍频后，激光器输出脉冲宽度 140 fs、平均功率 520 mW 的 783 nm 超短脉冲。搭建的重复频率锁定的飞秒脉冲激光器重复频率为 77.1 MHz；重复频率锁定精度为 1.2 mHz。本文所使用的方案具有高可靠性和高稳定性的特点，有利于实现系统小型化，有望应用于室外双光梳光谱检测、双光梳测距等应用。

参考文献：

- [1] TADOKORO Y, TAKIDA Y, KUMAGAI H, et al. Comparative study on THz time-domain spectroscopy using 780-nm 1.3-ps laser pulses with different detections of LT-GaAs photoconductive antenna and ZnTe electro-optic sampling[C]//Proceedings Volume 8604, Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications XII. San Francisco, California, United States: SPIE, 2013: 86040D.
- [2] ZACH A, MOHSENI M, POLZER C, et al. All-fiber widely tunable ultrafast laser source for multimodal imaging in nonlinear microscopy[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(21): 5218 – 5221.
- [3] 郑世凯, 杨康文, 敖建鹏, 等. 光纤式相干拉曼散射成像光源研究进展 [J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0508008.
- [4] KRAUSS G, HANKE T, SELL A, et al. Compact coherent anti-Stokes Raman scattering microscope based on a picosecond two-color Er: fiber laser system[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(18): 2847 – 2849.
- [5] LIU H G, HU M L, SONG Y J, et al. Operation of Kerr-lens mode-locked Ti: sapphire laser in the non-soliton regime[J]. *Chinese Physics B*, 2010, 19(1): 372 – 377.
- [6] 宋海声, 刘宇平, 滕浩, 等. 采用飞秒光纤激光同步泵浦的自启动锁模钛宝石激光研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(11): 111008.
- [7] MILLO J, BOUDOT R, LOURS M, et al. Ultra-low-noise microwave extraction from fiber-based optical frequency comb[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(23): 3707 – 3709.
- [8] FORTIER T M, KIRCHNER M S, QUINLAN F, et al. Generation of ultrastable microwaves via optical frequency division[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(7): 425 – 429.
- [9] UDEM T, HOLZWARATH R, HÄNSCH T W. Optical frequency metrology[J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 233 – 237.
- [10] LUDLOW A D, BOYD M M, YE J, et al. Optical atomic clocks[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2015, 87(2): 637 – 701.
- [11] 张宏飞, 苏波, 何敬锁, 等. 超快太赫兹时域光谱系统 [J]. *应用光学*, 2019, 40(2): 229 – 232.
- [12] 吴冠豪, 周思宇, 杨越棠, 等. 双光梳测距及其应用 [J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1504002.
- [13] RIEGER S, HELLWIG T, WALBAUM T, et al. Optical repetition rate stabilization of a mode-locked all-fiber laser[J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 4889 – 4895.
- [14] SHEN X L, HE B Q, ZHAO J, et al. Repetition rate stabilization of an erbium-doped all-fiber laser via optomechanical control of the intracavity group velocity[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(3): 031117.
- [15] 王少峰, 武腾飞, 曹士英, 等. 全保偏掺 Er 光纤激光器重复频率锁定技术的研究 [J]. *计测技术*, 2017, 37(6): 8 – 12,55.
- [16] KONG L J, ZHAO L M, LEFRANCOIS S, et al. Generation of megawatt peak power picosecond pulses from a divided-pulse fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(2): 253 – 255.
- [17] LUO P, HAO Q, FU H M, et al. 60 nJ, 95 fs environmentally stable Er-doped fiber laser system[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(6): 061401.

(编辑: 李晓莉)