

# 186 MHz 低幅度噪声掺铒光纤飞秒激光器

闫露露<sup>1,2</sup> 张颜艳<sup>2</sup> 赵文字<sup>2,3</sup> 孟森<sup>4</sup> 郑恩让<sup>1</sup> 郭文阁<sup>2,4</sup> 姜海峰<sup>2\*</sup> 张首刚<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 陕西科技大学电气与信息工程学院, 陕西 西安 710021  
<sup>2</sup> 中科院国家授时中心时间频率基准重点实验室, 陕西 西安 710600  
<sup>3</sup> 中国科学院大学, 北京 100049  
<sup>4</sup> 西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065

**摘要** 飞秒激光器是激光频率测量系统——飞秒光梳的核心部件,其噪声、重复频率、脉冲宽度、光谱等参数决定了它在应用中的表现。报道了用于 9.2 GHz 基于光学腔超稳微波源的掺铒光纤飞秒激光器的研制。该激光器采用环形腔结构,重复频率为 186 MHz,直接输出功率为 120 mW,光谱中心波长为 1550~1600 nm。采用动态信号分析仪测试了双边带噪声功率谱,结果显示:研制的飞秒激光器自由运转时,1 Hz 处双边带幅度噪声为 -118 dBc/Hz,在 10 Hz 到 100 kHz 频率范围内幅度噪声小于 -130 dBc/Hz。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 锁模激光器; 幅度噪声; 频率稳定度

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0802004

## 186 MHz Low Amplitude Noise Erbium-Doped-Fiber Femtosecond Laser

Yan Lulu<sup>1,2</sup> Zhang Yanyan<sup>2</sup> Zhao Wenyu<sup>2,3</sup> Meng Sen<sup>4</sup> Zheng Enrang<sup>1</sup>  
Guo Wenge<sup>2,4</sup> Jiang Haifeng<sup>2</sup> Zhang Shougang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Electrical and Information Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710021, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Time & Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China  
<sup>3</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>4</sup> College of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China

**Abstract** Femtosecond laser is the most important part of an optical frequency comb, whose performance is mainly determined by the laser's noise level, repetition rate, pulse width, spectrum and other parameters. A home-made erbium-doped-fiber femtosecond laser with ring structure and a repetition rate of 186 MHz is reported. This laser is designed for 9.2 GHz ultra-stable photonics microwave generation. The laser has an output power of 120 mW, and its spectrum center wavelength is in the range from 1550 nm to 1600 nm. The double-sideband relative intensity noise of the laser is -118 dBc/Hz at 1 Hz measured with a signal dynamic analyzer. From 10 Hz to 100 kHz, the relative intensity noise level is well below -130 dBc/Hz.

**Key words** lasers; fiber lasers; mode-locked lasers; amplitude noise; frequency stability

**OCIS codes** 120.3940; 140.3500; 140.3510; 140.3560; 140.4050

收稿日期: 2014-01-13; 收到修改稿日期: 2014-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(91336101,61127901,61025023)、西部之光重点项目(2013ZD02)

作者简介: 闫露露(1989—),女,硕士研究生,主要从事飞秒光梳研制方面的研究。

E-mail: yanluyanhong@163.com

导师简介: 郑恩让(1962—),男,教授,主要从事智能控制方面的研究。E-mail: zhenger@sust.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: haifeng.jiang@ntsc.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

# 1 引 言

飞秒光梳诞生于 20 世纪末,它可以简单有效地进行光学频率合成和测量,推动了计量科学,特别是频率计量的发展,实现了光学频率的直接测量<sup>[1-2]</sup>。而在此之前,光学频率测量需要经过近 10 个环节的频率转换,十几位科学家利用庞大而复杂的专用设备经过几年努力才能完成<sup>[3-4]</sup>。由于光梳的发明,德国马普量子光学所(MPQ)的 Hänsch 教授<sup>[5]</sup>和美国国家标准与技术研究院和科罗拉多大学联合天文实验室(NIST-JILA)的 Hall 教授<sup>[6]</sup>获得了 2005 年诺贝尔物理学奖。飞秒激光器是飞秒光梳的核心部件。根据采用的飞秒激光器增益介质的不同,飞秒光梳分为基于 Ti:sapphire(/Cr:LiSAF/Yb:KYW...)晶体的固体飞秒光梳和基于掺铒(/掺镱/掺钕...)光纤的光纤飞秒光梳两类。后者具有体积小、稳健性好、稳定度高、功耗小、操作灵活等优点,引起了广泛关注,已被应用于光钟频率精确测量和比对<sup>[7]</sup>、超稳微波产生<sup>[8]</sup>、大尺度空间距离高精度测量<sup>[9]</sup>、高精度时间频率传递<sup>[10]</sup>、天文测量<sup>[11]</sup>、太赫兹信号产生和控制<sup>[12]</sup>以及环境监测<sup>[13]</sup>等领域。

飞秒激光器的参数,如噪声、重复频率、脉冲宽度、光谱等,直接影响飞秒光梳的性能指标。根据应用的不同,国际和国内多家实验室开展了掺铒光纤飞秒激光系统的研制<sup>[14-15]</sup>。由于目前抽运源功率、现有光纤特性等方面的限制,频率计量用掺铒光纤飞秒激光器一般重复频率范围在 100~300 MHz。Menlo system 的 FC1500 重复频率为 250 MHz,台湾工业大学 2009 年报道的光梳重复频率为 300 MHz<sup>[16]</sup>,中国计量科学研究院 2012 年报道的光梳系统重复频率为 128 MHz<sup>[17]</sup>,北京大学 2010 年报道的系统重复频率为 225 MHz<sup>[18]</sup>。中国科学院国家授时中心光梳研究小组在国家自然科学基金项目的资助下,2013 年初,开展掺铒飞秒光梳的研制,旨在用于守时型铯原子喷泉钟 9.2 GHz 超稳微波源的产生,这项应用要求飞秒激光器有较小的幅度噪声。本文报道了本小组掺铒飞秒光纤激光器的最新实验研究结果。结果显示,自主研发的系统在幅度噪声和自由运转频率稳定度两方面均优于 Menlo 公司的 FC1500 产品,基本满足了进一步研制的要求。

# 2 实验部分

光纤锁模激光器工作的关键是激光信号在谐振腔内能够形成稳态超短脉冲,超短脉冲的形成是光纤非线性效应(自相位调制和四波混频)和光纤色散

共同作用的结果。超短脉冲在腔内形成后,每个周期将有部分能量被耦合到输出端,因此输出脉冲重复频率  $f_r$  是由脉冲在腔内的运行时间决定。

腔内色散、增益和损耗是影响激光器性能的主要因素。此外,环境的振动和温度漂移会导致激光器腔体参数改变,进而影响激光器的功率、光谱等。同时,激光抽运源的驱动功率稳定性也会转化为激光器的幅度噪声。

自制的飞秒激光器结构如图 1 所示,光学腔为环形结构,由大约 11 cm 自由空间和 98 cm 光纤构成,其中增益光纤长为 45 cm。激光器增益介质采用的是 LIEKKI 公司的 Er110-4/125 光纤,准直器及波分复用器的尾纤采用的是单模 SMF-28 和 HI1060 Flex 光纤,其中 HI1060 Flex 长度为 6 cm,SMF-28 对波长 1550 nm 的色散系数不大于 18 ps/(nm·km),最终腔内光纤净色散约为 -500 fs<sup>2</sup>。自由空间部分(即两个国产定制准直器 CO<sub>1</sub>~CO<sub>2</sub>之间)包含四个零级波片和一个偏振分束晶体,所用波片表面镀 C-band 增透膜,单次光通过损耗约为 1%。通过调节波片,可以改变激光偏振态,进而控制偏振分束晶体的输出激光功率。激光器的抽运源是最大功率为 1 W、功率可调、中心波长为 976 nm 光纤光栅反馈高功率二极管激光器。

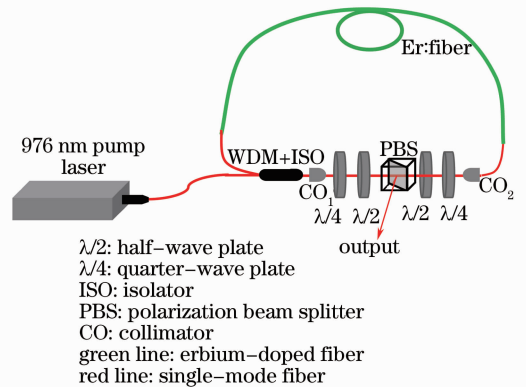


图 1 掺铒飞秒光纤光梳结构图

Fig. 1 Schematic of the Er: fiber femtosecond laser

实验中,先将抽运激光初始功率设为 1 W,并配合调节各波片使激光器进入锁模状态。为使抽运激光器运行寿命更长,调低抽运功率至 880 mW,激光器保持稳定的锁模状态,锁模激光器光谱用 AQ6370C 测得如图 2 所示,光谱中心波长在 1570 nm 左右,3 dB 线宽约为 40 nm,对应脉宽约为 100 fs。在激光器输出端用 PM100D 功率计(S132C 探头)测得功率为 120 mW,抽运功率到光纤激光器输出功率转化效率为 13.6%,高于 Menlo 公司的 FC1500(1 W 抽运/

100 mW 输出, 250 MHz)、中国计量科学研究院 (600 mW 抽运/60 mW 输出, 128 MHz)<sup>[17]</sup> 和北京大学 (700 mW 抽运/70 mW 输出, 225 MHz)<sup>[18]</sup> 的同类系统的效率 (效率约为 10%)。

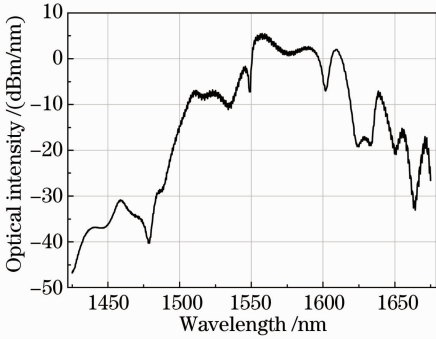


图 2 880 mW 抽运时, 锁模激光器光谱

Fig. 2 Optical spectrum of the mode-locked laser with 880 mW pump power

高的转换效率可以使系统利用更小的驱动电流产生相同的输出功率, 提高激光管的使用寿命, 进而增强系统的稳健性。这一点对一些不能更换部件的特殊应用 (如航天系统) 极为重要。实验中获得高转

换效率首要原因是环路光纤种类和长度的搭配设计: 1) 通过数值计算选择合理的腔内光纤搭配 (包括环路内光纤种类、长度和自由空间器件), 使腔体满足低能量光孤子存在条件; 2) 增益光纤长, 有利于抽运光的利用。转换效率高的另一个原因是严格控制了自由空间部分由于耦合等原因产生的腔损耗, 系统的光纤到光纤耦合率高达 90%。

图 3 给出了利用 EOT 公司 2 GHz 带宽光电管直接测量飞秒激光信号获得的射频频谱, 从图 3 (a), (b) 可以发现, 重复频率约为 186 MHz, 且频谱没有杂散调制噪声, 说明锁模状态较好。

为评估自制系统的性能, 测试了自制系统及 Menlo 公司 2013 生产的 FC1500 飞秒光梳内掺铒飞秒锁模激光器的幅度噪声水平和自由运转频率稳定度, 并与美国 NIST 实验室搭建的重复频率为 200 MHz 的掺铒飞秒激光器实验系统测量结果<sup>[19]</sup> 进行了比较。具体测试方法为: 将两个激光器输出信号分别引入光电探测器, 然后用动态信号分析仪分析光电转换后的双边带噪声功率谱, 两次测试所用探测器和仪器均相同, 测试精度应优于 1 dB。

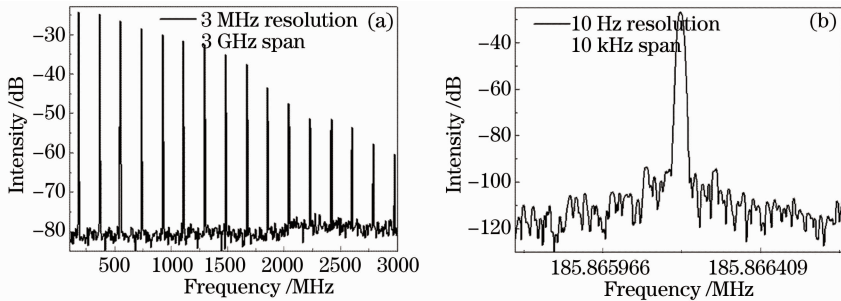


图 3 锁模激光器输出光电探测频谱。(a) 0~3 GHz 范围 3 MHz 分辨率谱; (b) 重复频率为 186 MHz 处 10 Hz 分辨率旁频频谱

Fig. 3 RF spectra of the mode-locked laser. (a) Spectrum measured with 3 MHz resolution between 0 and 3 GHz; (b) spectrum around repetition rate of 186 MHz with 10 Hz resolution

结果如图 4 所示, 在 1 Hz 到 100 kHz 的测试区间内, 自制的激光器幅度噪声全面低于 FC1500 系统; 在 10 Hz 到 100 kHz 区间内, 差别较为明显, 达到 5 dB~10 dB。研制的掺铒光纤飞秒激光器将用于基于光学腔的超稳微波源研制, 微波源的目标白相位噪声在 -150 dBc/Hz 以下; 由于幅度噪声在光电探测器内能够转化为频率噪声<sup>[20]</sup>, 因此需要严格控制飞秒激光器的幅度噪声水平。研制激光器的噪声小可能有如下原因: 1) 激光器的锁模状态稳定, 锁模状态竞争力强, 对抽运源和环境噪声的敏感度低; 2) 系统采用低噪声抽运驱动电源, 减小了抽运功率抖动; 3) 实验装置对环境噪声进行了有效隔

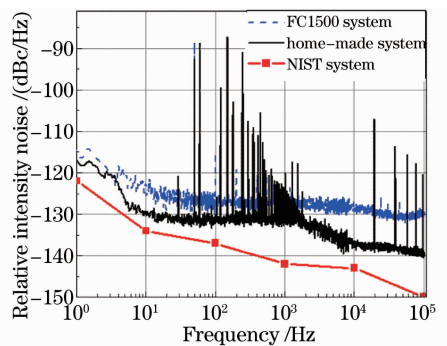


图 4 锁模激光器双边带幅度噪声测量结果图: 自制、FC1500 及 NIST 实验系统

Fig. 4 Double-sideband relative intensity noise curves of the home-made laser, FC1500 and the NIST system

离,采用了两层封闭箱体,内层为铝金属箱,外层为有机玻璃箱,目前尚未进行温度控制。从图4可以看出,在整个频率区间内,研制系统的噪声水平要比NIST实验系统高5 dB~10 dB。

用安捷伦53131A频率计数器分别记录了研制的激光器和商用FC1500激光器的自由运转的激光器重复频率,获得其频率的Allan方差见图5。研制激光器的重复频率的抖动在0.001~100 s大部分范围内小于商用系统,只在1 s和50 s左右略差于商用系统,在0.001 s(对应1 kHz)处自制激光器频率抖动低30倍。导致这一差异的原因可能是自制的实验系统对音频噪声有较高的抑制作用,同时采用的抽运源驱动器噪声较低。由于重复频率在光梳系统中将受控,一般千赫兹范围内均能实现很高的噪声抑制,但是在千赫兹以上的频率噪声抑制将逐渐困难,因此较小的高频频率抖动有利于减小最终光梳的频率控制难度。

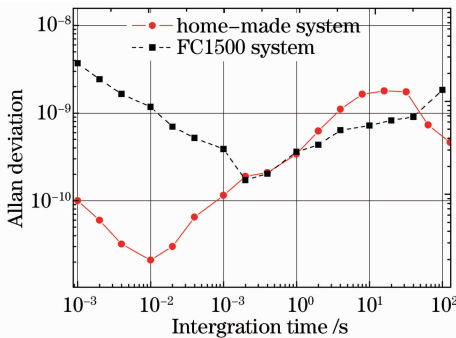


图5 自由运转激光器重复频率稳定度  
Fig.5 Frequency stability of repetition rate of free-running laser

### 3 结 论

介绍了自主研制的重复频率为186 MHz掺铒光纤飞秒激光器,光谱带宽约为40 nm,适用于进一步研制光学频率测量光梳系统。该激光器的输出功率转换效率大于13%高于国内报道的同类激光器;1 Hz处激光器的双边带幅度噪声约为-118 dBc/Hz,在10 Hz到100 kHz范围内幅度噪声低于-130 dBc/Hz,比商用系统噪声低5 dB~10 dB;激光器的短期自由运转频率稳定度也优于商用系统。

### 参 考 文 献

1 T Udem, J Reichert, R Holzwarth, *et al.*. Accurate measurement of large optical frequency differences with a mode-locked laser[J]. *Opt Lett*, 1999, 24(13): 881-883.  
2 S A Diddams, David J Jones, Jun Ye, *et al.*. Direct link between

microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 84(22): 5102.  
3 D Touahri, F Nez, M Abed, *et al.*. LPTF frequency-synthesis chain-results and improvement for the near future[J]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 1995, 44(2): 170-172.  
4 H Schnatz, B Lipphardt, J Helmcke, *et al.*. First phase-coherent frequency measurement of visible radiation[J]. *Phys Rev Lett*, 1995, 76(1): 18-21.  
5 T Hänsch. Nobel lecture: passion for precision[J]. *Rev Mod Phys*, 2006, 78(4): 1297-1309.  
6 J Hall. Nobel lecture: defining and measuring optical frequencies[J]. *Rev Mod Phys*, 2006, 78(4): 1279-1295.  
7 Y Nakajima, H Inaba, K Hosaka, *et al.*. A multi-branch, fiber-based frequency comb with millihertz-level relative linewidths using an intra-cavity electro-optic modulator[J]. *Opt Express*, 2010, 18(2): 1667-1676.  
8 J Millo, M Abgrall, M Lours, *et al.*. Ultralow noise microwave generation with fiber-based optical frequency comb and application to atomic fountain clock[J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 94(14): 1-3.  
9 I Coddington, W C Swann, L Nenadovic, *et al.*. Rapid and precise absolute distance measurements at long range[J]. *Nat Photonics*, 2009, 3(6): 351-356.  
10 F Giorgetta, W C Swann, L C Sinclair, *et al.*. Optical two-way time and frequency transfer over free space[J]. *Nat Photonics*, 2013, 7: 434-438.  
11 G Ycas, F Quinlan, S Diddams, *et al.*. Demonstration of on-sky calibration of astronomical spectra using a 25 GHz near-IR laser frequency comb[J]. *Opt Express*, 2012, 20(6): 6631-6643.  
12 S Barbieri, Pierre Gellie, Giorgio Santarelli, *et al.*. Phase-locking of a 2.7-THz quantum cascade laser to a mode-locked erbium-doped fibre laser[J]. *Nat Photonics*, 2010, 4(9): 636-640.  
13 L Nugent-Glandorf, T Neely, F Adler, *et al.*. Mid-infrared virtually imaged phased array spectrometer for rapid and broadband trace gas detection[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(15): 3285-3287.  
14 Zhang Zhigang. Advances in high repetition rate femtosecond fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900130. 张志刚. 高重复频率飞秒光纤激光技术进展[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900130.  
15 Wu Xuejian, Li Yan, Wei Haoyun, *et al.*. Femtosecond optical frequency combs for precision measurement applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(3): 030001. 吴学健, 李岩, 尉昊贇, 等. 飞秒光学频率梳在精密测量中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(3): 030001.  
16 J Peng, T Liu, R Shu. The pump power was coupled spatially octave-spanning fiber laser comb with 300 MHz comb spacing for optical frequency metrology[C]. *Conference on Laser and Electro-Optics*, Baltimore USA, 2009.  
17 Cao Shiyang, Meng Fei, Lin Baikai, *et al.*. Precise frequency control of an Er-doped fiber comb[J]. *Acta Physics Sinica*, 2012, 61(13): 134205. 曹士英, 孟飞, 林百科, 等. 长时间精密锁定的掺Er光纤飞秒光学频率梳[J]. *物理学报*, 2012, 61(13): 134205.  
18 D Ma, Y Cai, C Zhou, *et al.*. 37.4 fs pulse generation in an Er-fiber laser at 225 MHz repetition rate[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(17): 2858-2860.  
19 F Quinlan, T M Fortier, M S Kirchner, *et al.*. Ultralow phase noise microwave generation with an Er: fiber-based optical frequency divider[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(16): 3260-3263.  
20 J Taylor, S Datta, A Hati, *et al.*. Characterization of power-to-phase conversion in high-speed P-I-N photodiodes[J]. *IEEE Photonics J*, 2011, 3(1): 140-151.

栏目编辑:王晓琰