

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.03.14

# 阿秒时间抖动的全保偏掺铒光纤激光器

赵洺贺<sup>1,2</sup>, 杨若傲<sup>2</sup>, 陈子扬<sup>2</sup>, 王爱民<sup>2</sup>, 李倩<sup>1</sup>, 张志刚<sup>2\*</sup>

(1. 北京大学信息工程学院, 广东深圳 518055;

2. 北京大学电子学院区域光纤通信网和新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 近年来, 超稳光生微波和远距离时频同步等高精度、高速科学研究对低噪声飞秒光纤激光器具有迫切的需求。为实现低时间抖动噪声的激光种子源, 基于“光积木”结构, 设计并搭建了一台重复频率为 100 MHz 的全保偏掺铒锁模光纤激光器, “光积木”结构可以有效地抑制激光器的机械噪声和重频漂移。采用平衡光学互相关技术, 首次从全保偏锁模光纤激光器的出射脉冲中直接进行了高精度的时间抖动测量。该激光器在傅里叶频率 10 kHz 至 1 MHz 的积分区间内, 积分均方根时间抖动仅为 98.36 as。

**关键词:** 飞秒激光器; 时间抖动; 平衡光学互相关

**中图分类号:** TB939

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2023)03-0144-05

## All-PM Er: fiber laser with attosecond timing jitter

ZHAO Minghe<sup>1,2</sup>, YANG Ruo'ao<sup>2</sup>, CHEN Ziyang<sup>2</sup>, WANG Aimin<sup>2</sup>, LI Qian<sup>1</sup>, ZHANG Zhigang<sup>2\*</sup>

(1. School of Electronic and Computer Engineering, Peking University, Shenzhen, 518055, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks,

School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** In recent years, low-noise femtosecond fiber lasers are widely demanded in high-precision and high-speed research such as ultra-stable photogenerated microwave and long-distance time-frequency transfer. To realize a laser seed with low-timing-jitter noise, an 100 MHz all-polarization-maintaining mode-locked Er: fiber laser was demonstrated on "optical cube". The "optical cube" configuration can effectively suppress the mechanical noise and the drift of the repetition rate. Based on the balanced optical cross-correlator technique, this is the first time to perform high-precision time jitter measurement of the pulse train directly from an all polarization-maintaining mode-locked Er: fiber laser. The integrated root-mean-square timing jitter from 10 kHz to 1 MHz offset frequency is only 98.36 as.

**Key words:** femtosecond laser; timing jitter; balanced optical cross-correlator

## 0 引言

近年来, 低噪声的被动锁模激光器在超远距离时间同步<sup>[1]</sup>和超稳光生微波<sup>[2-3]</sup>等高精度科学实验中发挥了重要的作用。相比固体激光器而

言<sup>[4]</sup>, 被动锁模光纤激光器可以直接使用半导体激光器泵浦, 结构紧凑、制作成本低、腔内光路更易对准。通过设计合适的腔结构, 被动锁模光纤激光器可以提供良好的噪声性能<sup>[5-7]</sup>。在被动锁模中, 非线性放大环形镜 (Nonlinear Amplifying

收稿日期: 2022-12-30; 修回日期: 2023-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(U2031208; 61761136002; 61575004)

引用格式: 赵洺贺, 杨若傲, 陈子扬, 等. 阿秒时间抖动的全保偏掺铒光纤激光器[J]. 计测技术, 2023, 43(3): 144-148.

**Citation:** ZHAO M H, YANG R A, CHEN Z Y, et al. All-PM Er: fiber laser with attosecond timing jitter[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(3): 144-148.



Loop Mirror, NALM) 是一种可实现全保偏结构的锁模机制<sup>[8]</sup>, 即腔内的增益光纤和单模光纤均为保偏光纤, 大幅提高了激光器的环境稳定性<sup>[9]</sup>。因此, 在NALM锁模光纤激光器中实现极低的时间抖动是一种很有吸引力的解决方案。

2016年, Kuse N等人<sup>[10]</sup>利用全保偏结构的掺铒九字腔激光器制作了光学频率梳, 并用平衡光学互相关方法表征了时间抖动噪声水平, 从10 kHz~10 MHz的积分均方根时间抖动为40 as。该激光器为全光纤结构, 除了调制器和相移器模块之外还含有定制器件, 在测量时间抖动前, 输出脉冲经历了压缩和放大。

Pi Y等人<sup>[11]</sup>于2021年使用延迟光学外差法表征了一台全保偏九字腔掺铒光纤激光器的时间抖动噪声水平, 从10 Hz~1 MHz积分区间内的均方根时间抖动为1.9 fs。2021年, Ma Y等人<sup>[12]</sup>使用平衡光学互相关技术表征了一台全保偏掺铒九字腔光纤激光器, 并基于此种种子源制作了光学频率梳, 该激光器无需进行腔内光路对准, 从25 kHz~5 MHz的积分均方根时间抖动为700 as。余泓漪等人<sup>[13]</sup>于2022年搭建了一套无需参考激光器的时间抖动测量系统, 测量了一台全保偏NALM锁模光纤激光器时间抖动, 测得其在100 Hz~10 kHz的积分区间内的时间抖动均方根值为10.1 fs。

但是, NALM锁模激光器很难避免在腔内使用自由空间元件, 特别是法拉第旋光器、偏振分束器和色散补偿器件等。即使是无需使用光栅对补偿色散的掺铒光纤激光器, 也很难避免在腔内使用法拉第旋光器和偏振分束器。因此在上文提及的光纤激光器中, 松散的自由空间结构仍然会引入较大的时间抖动噪声。

Yang R等人<sup>[14]</sup>于2022年提出, 激光器自由空间元件的松散结构使其极易受到外界环境的干扰, 使激光器内禀噪声淹没在机械噪声中。运用所谓“光积木”方法, 研制了一种重复频率为840 MHz的“固态-光纤激光器”, 证明了“光积木”结构大幅改善了高重复频率光纤激光器的时间抖动噪声, 通过平衡光学互相关方法表征, 从10 kHz~1 MHz的积分均方根时间抖动为130 as。

本文将“光积木”设计与NALM锁模相结合, 设计并搭建了一台低时间抖动噪声的NALM锁模全

保偏掺铒光纤激光器。激光器的重复频率为100 MHz, 并利用平衡光学互相关技术测量了激光器的时间抖动功率谱, 在10 kHz~1 MHz的积分区内, 自由运行的时间抖动低至98.36 as。这是首次从NALM锁模激光器直接输出的脉冲测量时间抖动, 不需要任何(如放大和脉冲压缩等)后处理技术。

## 1 激光器结构与基本性能

基于“光积木”结构的全保偏NALM锁模光纤激光器的实物如图1所示, 结构示意图如图2所示。在保偏光纤环内, 一段45 cm长的保偏掺铒光纤(Er80-4/125-PM, LIEKKI)被用作增益介质, 其余光纤为标准保偏单模光纤。增益光纤在光纤环内非对称熔接, 更容易建立锁模<sup>[15]</sup>。光脉冲在保偏光纤环内沿单轴双向传播, 并通过准直器出射, 经过1/2波片调整偏振方向后, 在偏振分束镜处合束。合束后的光依次经过法拉第旋转器和1/4波片, 并经另一块偏振分束镜部分输出, 而留在腔内的光被银镜反射。法拉第旋转器、1/4波片

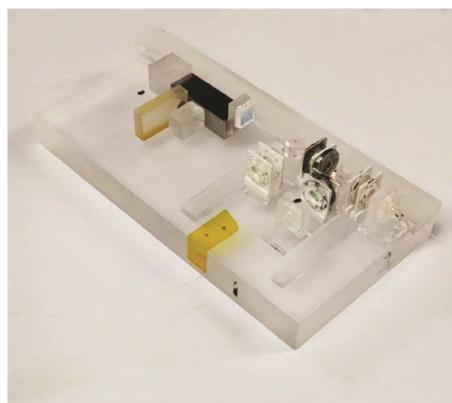


图1 激光器实物照片

Fig.1 Photograph of the laser

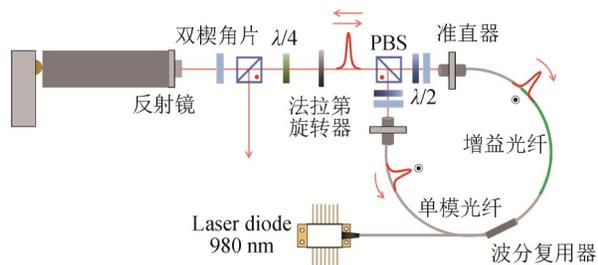


图2 激光器结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the Er:fiber laser

和反射镜组成了非互易相移器，通过旋转波片，改变相移的大小，可以使激光器实现自启动<sup>[16]</sup>。

为实现“光积木”的结构设计，所有器件都安装在陶瓷底座上，并使用紫外胶将激光腔内所有的自由空间器件粘合在尺寸为145 mm × 75 mm × 15 mm的熔融石英块上。去除激光器的机械结构后，为实现“光积木”结构下的腔内光路对准，腔内设计了靠体结构和三组双楔角片结构，可分别实现腔内光路的初步对准和精密调节。此外，为进一步减小光纤部分引入的机械噪声，保偏光纤也全部被固定在一块不锈钢板上。

这种“光积木”的结构设计大大降低了激光器的机械噪声，也削弱了环境温度变化对重复频率的影响。通过频率计数器和温度传感器记录了激光器自由运行20 h内的重复频率漂移和实时温度变化。在没有温度稳定设施的实验室环境下，激光器在20 h内的重复频率漂移不超过300 Hz，自由运行时的重复频率的均方根(Root Mean Square, RMS)漂移量仅为106.72 Hz。

激光器的反射镜模块设计为可以精密移动，但不会影响腔内光路准直的结构。移动反射镜的位置可以改变NALM激光器线性臂的长度，使激光

器的重复频率可以精确地调整。在本工作中，激光器的重复频率被较精确地固定至100 MHz。如图3所示，利用一台商用自相关仪(Pulse Check USB, APE)测量激光器输出脉冲的自相关迹，测得脉冲持续时间为185 fs，激光器的平均输出功率为6 mW。

### 2 基于平衡光学互相关的时间抖动测量

为了使用平衡光学互相关技术来实现高分辨力的时间抖动测量，需要搭建两台近似相同的“光积木”结构激光器<sup>[17]</sup>，一台作为参考激光器，另一台作为待测激光器。时间抖动测量系统的整体结构如图4所示。参考激光器和待测激光器均处于自由运转状态，两台激光器出射的脉冲经过1/2波片调整偏振方向后，在偏振分束棱镜处合束；合束后的光被聚焦至PPKTP晶体产生和频光；和频光通过透镜准直后经过滤波器进入平衡光电探测器(PDB210A)的一个探测通道；剩余的基频光被二相色镜反射，再次被聚焦至PPKTP晶体，产生第二路和频光；第二路和频光被透镜准直后，被二相色镜反射，经过滤波进入平衡光电探测器的第二路探测通道。

两路和频信号为参考激光器和待测激光器输出脉冲的互相关信号，其会在平衡光电探测器中做差从而得到鉴相信号，鉴相信号的频率为两台激光器的重复频率差。从平衡光电探测器中得到的鉴相信号一部分用于噪声测量，另一部分经PI伺服后反馈回待测激光器的泵浦电流，用于实现两台激光器的低带宽同步。在信号做差的过程中，两台激光器的共模噪声(如强度噪声等)会相互抵消，因此，基于平衡光学互相关技术的时间抖

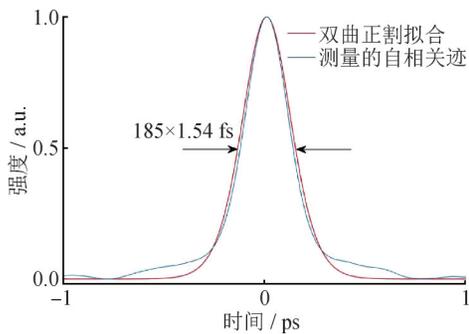


图3 输出脉冲的自相关曲线

Fig.3 Autocorrelation trace of output pulse

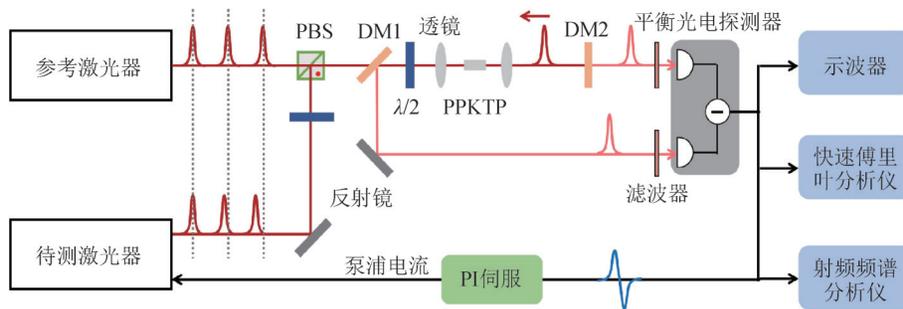


图4 平衡光学互相关测量系统

Fig.4 Balanced optical cross-correlator configuration

动测量,对激光器的强度噪声不敏感,克服了传统测量方式中的幅相噪声转换的问题<sup>[18]</sup>。

值得注意的是,利用平衡光学互相关探测时间抖动噪声时,通常会将激光器的输出脉冲进行放大和压缩,以获得更大的鉴相斜率和更低的探测噪声<sup>[5-6]</sup>。对于掺铒光纤激光器来说,通常自制掺铒光纤放大系统实现脉冲放大,并使用色散补偿光纤或者棱镜对实现脉冲压缩,而这将进一步使系统复杂化,使得放大和压缩系统的机械噪声抑制手段,对激光器时间抖动噪声的测量带来影响。此外,放大系统会引入Gordon-Haus噪声,影响激光器输出脉冲的时间抖动,且经过放大的脉冲也很难被压缩回放大前的脉宽,从而影响鉴相斜率<sup>[19]</sup>。而若激光器本身输出的脉冲经过平衡光学互相关系统可以得到足够低的测量极限,则应尽量避免对输出脉冲的放大和压缩处理,这样可以更好地研究激光器本身的噪声水平,也使测量系统更加简捷<sup>[14]</sup>。

在本研究中,激光器输出的脉冲被直接输入到平衡光学互相关探测系统中,未经过如放大和脉冲压缩等任何后处理,但脉冲能量过低会使平衡互相关信号非常弱。为此,采用高非线性的PPKTP作为和频晶体,并用焦距较短的透镜聚焦到和频晶体中来提高和频信号强度。通过平衡光电探测器(PDB210A)的技术指标和鉴相信号的峰值电压,可以计算得到光电探测器接收到的和频光功率为 $1.73 \mu\text{W}$ 。而PDB210A在和频光波段(780 nm)的最小可探测光功率为 $2.48 \text{ nW}$ ,远小于进入光电探测器的和频光功率。虽然激光器输出的脉冲能量只有 $60 \text{ pJ}$ ,但不会影响测量的灵敏度,且可以使探测系统获得足够的鉴相斜率,可以使用示波器观察平衡光电探测器输出的鉴相信号,其在时域上为一个准DC信号。通过上述提高和频信号强度的处理,鉴相信号的鉴相斜率为 $2.16 \text{ mV/fs}$ ,在该鉴相斜率下,BOC系统可以提供足够低的测量极限( $1.9 \times 10^{-8} \text{ fs}^2/\text{Hz}$ )。

### 3 测量结果

实验使用亚克力外壳和吸声海绵对两台激光器进行了良好的隔振隔声处理,尽量避免环境因素对测量结果的影响。将鉴相信号输入快速傅里

叶分析仪和射频频谱分析仪中,测量得到的时间抖动功率谱密度如图5所示。

实验中,泵浦二极管的驱动器选用Thorlabs CLD1015,在开启驱动器降噪滤波器的情况下,驱动器的调制带宽会降低至 $7.5 \text{ kHz}$ ,与图5中的测量结果基本一致。对时间抖动功率谱密度积分除以2并开方可以得到待测激光器的积分RMS时间抖动,如图5所示。由于测量时两台激光器已经低带宽同步,在锁定带宽之外两台激光器处于自由运转状态。在傅里叶频率 $10 \text{ kHz} \sim 1 \text{ MHz}$ 的积分区间内,自由运转状态的待测激光器的积分RMS时间抖动仅为 $98.36 \text{ as}$ 。

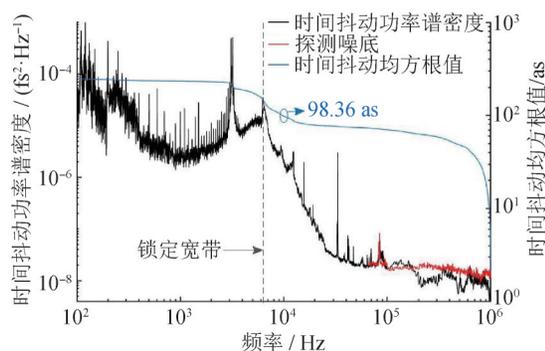


图5 待测激光器的时间抖动功率谱密度

Fig.5 Timing jitter power spectrum density of the measured laser

### 4 结束语

基于“光积木”结构设计的全保偏NALM锁模掺铒光纤激光器,在自由运转的工作状态,20 h内的重复频率漂移不超过 $300 \text{ Hz}$ 。使用平衡光学互相关技术实现了激光器时间抖动噪声的精确测量,待测激光器在傅里叶频率 $10 \text{ kHz} \sim 1 \text{ MHz}$ 的积分区间内,积分RMS时间抖动仅为 $98.36 \text{ as}$ 。

本文首次从NALM锁模掺铒光纤激光器的出射脉冲中直接测量时间抖动噪声。这种具有超低时间抖动的光纤激光器在时频传递、精密测距、低噪声射频提取等方面有潜在的应用。

### 参考文献

- [1] XIN M, ŞAFAK K, PENG M Y, et al. Attosecond precision multi-kilometer laser-microwave network[J]. Light: Science & Applications, 2017, 6(1): e16187 - e16187.
- [2] KIM J, KÄRTNER F X. Microwave signal extraction from femtosecond mode-locked lasers with attosecond relative

- timing drift[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(12): 2022–2024.
- [3] XIE X, BOUCHAND R, NICOLODI D, et al. Photonic microwave signals with zeptosecond-level absolute timing noise[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(1): 44–47.
- [4] CHEN W, SONG Y, JUNG K, et al. Few-femtosecond timing jitter from a picosecond all-polarization-maintaining Yb-fiber laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1347–1357.
- [5] 陈相森, 武腾飞. GHz 重复频率固体飞秒激光技术及应用[J]. *计测技术*, 2022, 42(4): 1–9.  
CHEN X M, WU T F. GHz repetition frequency solid-state femtosecond laser technology [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2022, 42(4): 1–9. (in Chinese)
- [6] KIM H, QIN P, SONG Y, et al. Sub-20-attosecond timing jitter mode-locked fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 260–267.
- [7] SONG Y, KIM C, JUNG K, et al. Timing jitter optimization of mode-locked Yb-fiber lasers toward the attosecond regime[J]. *Optics Express*, 2011, 19(15): 14518–14525.
- [8] FERMAN M E, HABERL F, HOFER M, et al. Nonlinear amplifying loop mirror[J]. *Optics Letters*, 1990, 15(13): 752–754.
- [9] JIANG T, CUI Y, LU P, et al. All PM fiber laser mode locked with a compact phase biased amplifier loop mirror [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(16): 1786–1789.
- [10] KUSE N, JIANG J, LEE C C, et al. All polarization-maintaining Er fiber-based optical frequency combs with nonlinear amplifying loop mirror [J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 3095–3102.
- [11] PI Y, TIAN H, LI R, et al. Timing jitter and intensity noise characterization of a 122 MHz all-PM NALM mode-locked fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(24): 1439–1442.
- [12] MA Y, SALMAN S H, LI C, et al. Compact, all-PM fiber integrated and alignment-free ultrafast Yb: fiber NALM laser with sub-femtosecond timing jitter[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(13): 4431–4438.
- [13] 余泓漪, 吴言, 田昊晨, 等. 基于光纤延迟线的时间抖动测量系统[J]. *计测技术*, 2022, 42(5): 103–107.  
YU H Y, WU Y, TIAN H C, et al. Timing jitter measurement system based on fiber delay line [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2022, 42(5): 103–107. (in Chinese)
- [14] YANG R, ZHAO M, JIN X, et al. Attosecond timing jitter from high repetition rate femtosecond "solid-state fiber lasers"[J]. *Optica*, 2022, 9(8): 874–877.
- [15] CHEN F, HAO Q, ZENG H. Optimization of an NALM mode-locked all-PM Er: fiber laser system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(23): 2119–2122.
- [16] HÄNSEL W, HOOGLAND H, GIUNTA M, et al. All polarization-maintaining fiber laser architecture for robust femtosecond pulse generation [M]//*Exploring the world with the laser*. Springer, Cham, 2018: 331–340.
- [17] 王童, 李明哲, 于子航, 等. 高精度光学定时探测技术及其应用研究[J]. *计测技术*, 2022, 42(5): 51–60.  
WANG T, LI M Z, YU Z H, et al. High precision optical timing detection technology and its application[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2022, 42(5): 51–60. (in Chinese)
- [18] KIM J, CHEN J, COX J, et al. Attosecond-resolution timing jitter characterization of free-running mode-locked lasers[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(24): 3519–3521.
- [19] KIM J, SONG Y. Ultralow-noise mode-locked fiber lasers and frequency combs: principles, status, and applications [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2016, 8(3): 465–540.

(本文编辑: 田艳玲)

第一作者: 赵洛贺 (1997—), 硕士研究生, 主要研究方向为超短脉冲激光技术。



通讯作者: 张志刚 (1955—), 教授, 主要研究领域为高重复频率光纤飞秒激光器的频率梳技术、光纤远距离频率传输和时间同步技术、时域脉冲相干合成技术等。1982年、1984年于北京工业大学分获理学学士和硕士学位, 1992年在澳大利亚 MONASH 大学获理学博士学位。教育部首批“长江学者奖励计划特聘教授”。历任北京工业大学讲师、日本国财团法人产业创造研究所客员研究员、日本国经济产业省新能源产业技术综合研究机构 NEDO Fellow、天津大学教授。目前主持国家自然科学基金重点项目、联合基金重点支持项目及国际合作项目。

