

## 面向室外应用的重复频率锁定皮秒脉冲光纤激光器

姚波<sup>1,2</sup>, 段典<sup>1</sup>, 豆贤安<sup>2,3</sup>, 陈雨君<sup>1,4</sup>, 刘孝兵<sup>1</sup>, 毛庆和<sup>1,2,4\*</sup><sup>1</sup>中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 光子器件与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031;<sup>2</sup>先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;<sup>3</sup>国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;<sup>4</sup>中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026

**摘要** 本文报道了一种可满足室外应用的具有重复频率锁定功能的皮秒脉冲光纤激光器。通过选用 Figure-9 光纤激光器结构, 并通过优化腔结构来调控非线性, 确保了激光器的快速锁模自启动功能; 采用低导热材料绝热封装创建“恒温”微环境, 松弛了室外环境下锁定重复频率对 PZT 频率调谐执行器件调谐量的要求。以此为基础, 设计并研制了质量仅为 3 kg 的 10 MHz、20 ps 锁模光纤激光器样机。在室温、极端温度(−40 °C 或 50 °C)和振动(加速度为 1.5g)环境下, 该激光器样机都能保持快速锁模自启动和重复频率锁定功能; 在室外环境下, 该激光器样机的重复频率锁定功能可抵御夏季高温环境下的 10 °C 温度波动。

**关键词** 激光器; 锁模激光; 皮秒脉冲; 重复频率锁定; 环境温度

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230663

## 1 引言

皮秒激光脉冲峰值功率高、光谱纯度好, 在众多领域具有重要应用<sup>[1]</sup>。利用调制半导体激光器<sup>[2]</sup>、短腔调 Q 固体激光器<sup>[3]</sup>、锁模固体激光器<sup>[4]</sup>和锁模光纤激光器<sup>[5]</sup>等都可产生皮秒激光脉冲。其中, 锁模光纤激光器具有结构紧凑、免维护和抗干扰能力强等优点, 现已成为最重要的皮秒脉冲光源之一。采用半导体可饱和吸收镜(SESAM)<sup>[6]</sup>、非线性偏振旋转(NPR)<sup>[7]</sup>以及非线性放大环形镜(NALM)<sup>[8]</sup>等可饱和吸收体, 被动锁模光纤激光器均可产生皮秒激光脉冲。并且, 这些锁模光纤激光器都能产生近变换限制的皮秒激光脉冲, 在工业制造和科学研究等领域发挥着重要作用。

但是, NPR 锁模光纤激光器易受外界环境变化的影响, 在许多复杂环境的工程应用中, 人们大多选用 SESAM 锁模光纤激光器和基于 NALM 锁模的 Figure-9 光纤激光器来产生皮秒激光脉冲, 以确保激光器的自启动功能。在外太空环境下, SESAM 锁模光纤激光器可以在 0 °C 至 45 °C 的温度范围内实现自启动<sup>[9]</sup>; Figure-9 光纤激光器在高精度主动控温环境下可以承受高达 13.9g 的加速度振动<sup>[10]</sup>。尽管如此, 在诸如精密测距<sup>[11]</sup>、激光雷达<sup>[12]</sup>、天文观测<sup>[13]</sup>等许多精密测量工程应用中, 还需要锁定皮秒激光脉冲的重复频率,

而复杂环境对锁模光纤激光器的重复频率造成了极大扰动, 从而使得复杂环境下锁定锁模光纤激光器的重复频率非常困难。虽然飞秒激光频率梳的发展已大大推动了光纤激光器重复频率锁定技术的进步<sup>[14-15]</sup>, 但实际工程应用中的复杂环境, 如昼夜和四季交替造成的高达 −40~50 °C 的大范围温度变化、运输和使用过程中的剧烈振动, 以及某些应用场合对激光源体积、重量、功耗等指标提出的苛刻要求, 都对在确保自启动功能的前提下锁定皮秒锁模光纤激光器的重复频率提出了新挑战。特别是实际工程中常用的皮秒脉冲的重复频率多在 10 MHz 及以下, 锁定重复频率涉及大范围频率调谐执行器件的高精度调控技术, 这些都使得锁定重复频率变得更为困难。

本课题组研制了一种可满足室外应用的重复频率锁定的锁模光纤激光器。通过选用 Figure-9 光纤激光器结构并调控腔内非线性获取自启动性能优良的皮秒脉冲; 通过绝热封装创建“恒温”微环境, 缓解对压电陶瓷(PZT)频率调谐执行器件频率调谐量的要求, 进而实现对低重复频率激光器的重复频率锁定。本文将报道本课题组研制的 10 MHz、20 ps 激光器样机的测试结果。在室温、极端温度和振动环境下, 激光器样机都能保持快速锁模自启动和重复频率锁定功能; 在室外环境下, 激光器样机既可快速锁模自启动, 又可在夏季

收稿日期: 2023-03-30; 修回日期: 2023-05-06; 录用日期: 2023-05-22; 网络首发日期: 2023-07-04

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405100, 2017YFB0405200)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB21010300)、国家自然科学基金(61805258)、安徽省科技重大专项(201903a07020021)、先进激光技术安徽省实验室主任基金(20191001)

通信作者: \*mqinghe@aiofm.ac.cn

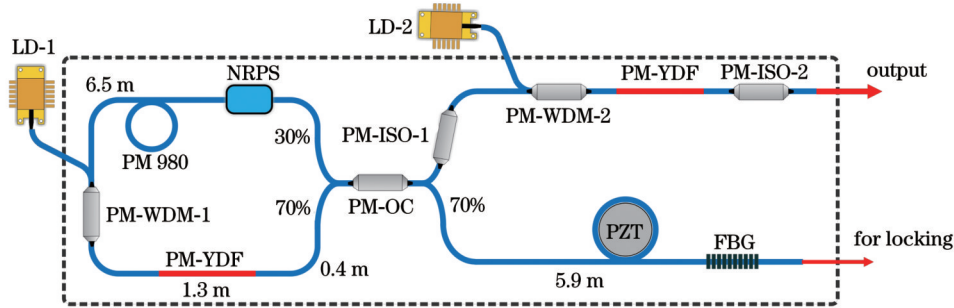
高温环境下抵御 10 °C 的温度变化,保持重复频率锁定。

## 2 激光器设计与研制

### 2.1 激光器结构设计

为满足复杂环境下的锁模自启动功能,采用图 1 所示的 Figure-9 光纤激光器产生皮秒脉冲。相比于 SESAM, Figure-9 光纤激光器中的 NALM 可饱和吸收体具有寿命长、免维护等优点,而且 Figure-9 光纤激光器的保偏光纤结构本身就可可在一定程度上抵御环境扰动的影响。光纤激光器采用保偏单模掺镱光纤 (PM-YDF) 作为增益光纤,其纤芯直径、数值孔径和吸收系数分别为 6  $\mu\text{m}$ 、0.11 和 250 dB/m@975 nm,

由带单模尾纤的 975 nm 激光二极管 (LD-1) 经保偏波分复用器 (PM-WDM-1) 泵浦。PM-YDF 的长度选定为 1.3 m,以保证足够的腔增益。将 PM-WDM-1 信号端口尾纤与产生  $-\pi/2$  固定相移的非互易相移器 (NRPS) 尾纤熔接,再将 NRPS 和增益光纤的另一端尾纤分别与  $2 \times 2$  保偏光纤耦合器 (PM-OC) 同侧的 30% 和 70% 端口连接,然后将 PM-OC 另一侧 70% 输出端与中心波长和反射率分别为 1064 nm 和 99% 的光纤布拉格光栅 (FBG) 相连接,就构成了典型的 Figure-9 光纤激光器。该激光器产生的皮秒脉冲由 PM-OC 的另一 30% 端口输出。值得注意的是,除增益光纤外,所用无源光纤 (尾纤) 的型号均为 PM 980。



PM: polarization maintaining; WDM: wavelength division multiplexer; YDF: ytterbium-doped fiber; LD: laser diode; ISO: isolator; NRPS: nonreciprocal phase-shifter; OC: optical coupler; FBG: fiber Bragg grating; PZT: piezoelectric transducer

图 1 Figure-9 光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Configuration of Figure-9 fiber laser

原理上,上述 Figure-9 光纤激光器能产生皮秒脉冲序列,但激光器的锁模自启动功能、输出脉冲质量及性能参数都与具体的腔结构参数有关。为此,本课题组将激光器设计目标固定为能实现锁模自启动并产生 10 MHz 重复频率、20 ps 脉宽的近变换限制脉冲。于是,根据 20 ps 近变换限制脉冲要求,选定 FBG 的 3 dB 带宽为 0.2 nm<sup>[16]</sup>。由于 20 ps 脉冲在光纤中传输时所受的色散影响可以忽略,通过兼顾锁模自启动功能、单脉冲运转区间大小和脉冲变换限制特性<sup>[17]</sup>,本课题组对 PM-YDF 与 PM-OC 之间(经 PM-WDM-1 和 NRPS)、PM-OC 与 PM-YDF 之间、PM-OC 与 FBG 之间的长度进行优化设计(即调控腔内光纤的非线性分布),优化后的长度分别为 6.5、0.4、5.9 m。如此,光纤激光器的总腔长为 20 m,对应的重复频率约为 10 MHz。

20 ps 脉冲所受光纤色散效应的影响可以忽略,这使得脉冲在光纤腔内成形时主要由非线性效应支配,进而导致皮秒锁模 Figure-9 光纤激光器存在单脉冲锁模区间<sup>[18]</sup>,限制了输出皮秒脉冲的能量,其平均功率仅为数毫瓦。为此,将由 PM-OC 的 30% 端口输出并经过保偏光隔离器 (PM-ISO-1) 后的皮秒脉冲输入到单模掺镱光纤放大器中,以实现皮秒脉冲功率和能量的提升。该掺镱光纤放大器的增益光纤与 Figure-9 光纤激光器所用增益光纤型号相同,长度为 1.2 m,由

LD-2 经 PM-WDM-2 前向泵浦,放大后的皮秒脉冲经 PM-ISO-2 后输出。

### 2.2 重复频率锁定

10 MHz 重复频率的 Figure-9 光纤激光器的腔长为 20 m,这对重复频率锁定提出了很高要求,特别是对频率调谐执行器件提出了极高要求。事实上,外界温度和形变的变化与光纤折射率和长度的相对变化量<sup>[19-20]</sup>的关系可以表示成

$$\begin{cases} \frac{\Delta n}{n} = \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial n}{\partial L} \Delta L \\ \frac{\Delta L}{L} = \frac{\partial L}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial L}{\partial L} \Delta L \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $n$  为光纤折射率; $L$  为光纤长度。定义单模光纤的热膨胀系数为  $\alpha = \partial L / (L \partial T)$ ,热光系数为  $\beta = \partial n / (n \partial T)$ ,应变系数为  $\epsilon = \Delta L / L$ ,折射率应变系数为  $\gamma = \partial n / (n \partial \epsilon)$ ,那么,根据式(1),可以获得 Figure-9 光纤激光器重复频率随外界温度和形变环境的变化,即

$$\Delta F_r = \frac{c}{n(L_1 + 2L_2)} \cdot [(\alpha + \beta)_T \cdot \Delta T + (\gamma + 1)_\epsilon \cdot \epsilon], \quad (2)$$

式中: $c$  为光速; $L_1$  和  $L_2$  分别为 Figure-9 光纤激光器中

光纤环和线形臂的长度。由式(2)可知,对于 10 MHz 重复频率的 Figure-9 光纤激光器,即使不考虑应变的影响,温度每变化 1 °C,重复频率也将变化约 70 Hz。

若假定昼夜温差为 15 °C,则对应的重复频率变化量为 1050 Hz。为实现对重复频率一昼夜的锁定,频率调谐执行器件的频率调谐范围应在 1050 Hz 以上。若以 PZT 作为频率调谐执行器件,即使将 PZT 安装在 Figure-9 光纤激光器的线形臂上,通过调谐 PZT,该段光纤的伸缩量也会达到 1050  $\mu\text{m}$ 。若进一步考虑四季交替造成的 30~50 °C 以上的温度变化,对 PZT 的调谐量将达到难以企及的水平。

为此,本课题组将图 1 所示的主振荡功率放大(MOPA)结构光源中除泵浦 LD 以外的光纤及光纤器件绝热封装在铝盒中(见 2.3 节),由于掺镱光纤的量子亏损相对较小<sup>[21]</sup>,且选用的光纤器件的插入损耗低,因而可以创造一个相对“恒温”的微环境。该“恒温”微环境可以大幅缓解昼夜温度的剧烈变化,从而降低重复频率锁定对 PZT 调谐量的要求。对于四季交替造成的温度变化,只需将激光器重复频率锁定到不同的确定频率(不同温度下自由运转激光器的中心频率)上,仅通过 PZT 补偿昼夜温度变化就可将重复频率锁定到该确定频率上,从而满足大多数实际应用要求。值得注意的是,该“恒温”微环境十分有利于确保激光器的锁模自启动功能。

选用三只性能参数完全相同的 PZT 构建如图 2(a)所示的环状频率调谐执行器件。PZT 呈 5 mm × 5 mm × 18 mm 的立方体状,其轴向压电系数为 0.05  $\mu\text{m}/\text{V}$ ,响应带宽约为 18 kHz。三只 PZT 呈 120° 对称星形排列,一端紧密粘贴在直径为 15 mm 的铝质圆柱体侧面,另一端粘贴在可径向移动的冠状滑块内侧。三个冠状滑块构成直径约为 55 mm 的可缠绕光

纤的开口圆环,当以相同的电压驱动三只 PZT 时,圆环的直径将随之改变。图 2(b)为 PZT 的实物照片。实际研制时,利用自动布纤机(型号为 GQ-RQ70B)将光纤盘绕 10 圈(尽管增多盘绕圈数可增大调谐量,但却会降低 PZT 的频率调谐精度),使用时则在 PZT 上预加偏压,以使光纤具有预张力。将该 PZT 频率调谐执行器件安装至图 1 所示 10 MHz 光纤激光器线形臂之后,实测重复频率调谐系数为 3.5 Hz/V,最大调谐量约为 400 Hz(最大电压为 120 V),从而在理论上可抑制至少 5 °C 的环境温度波动。

采用图 2(c)所示的反馈回路锁定激光器的重复频率。将光电探测器(PD)在 FBG 透射端探测的信号经带通滤波器(BPF)滤波分成两路,其中一路用于外部监测,另一路与频率参考混频,获取误差信号。所用频率标准为小型恒温晶振(OCXO,尺寸为 36 mm × 27 mm × 13 mm)的输出频率(为 10 MHz),OCXO 输出频率的不稳定度优于  $2.4 \times 10^{-12}$ @1 s。鉴于 OCXO 的频率恒为 10 MHz,与激光器实际重复频率可能存在较大偏离,故引入频率可调发生器(DDS),并将其参考至 OCXO 上。因此,锁定回路的实际频率参考为 DDS 的输出频率。混频器获得的误差信号经伺服控制器后产生反馈控制信号,驱动 PZT 频率调谐执行器件。反馈电路集成在 10 cm × 15 cm 的电路板上,有效降低了激光器的体积和重量。

### 2.3 激光器集成封装

激光器工程样机采用光电分离、无附加温控的集成装配方案。光学模块包括图 1 虚线框内所示的光纤及光纤器件。光学模块集成封装的目的主要是创造一个可缓解温度剧烈变化的“恒温”微环境。为此,将光纤及光纤器件均用硅脂胶牢固粘贴至铝盒底部,图 3(a)为铝盒结构。利用热导率为 0.018 W/(m·K)、密度为 180 kg/m<sup>3</sup>的纳米气凝胶毡保温材料严密地包裹密封铝盒。利用高低温试验箱测试铝盒的绝热封装性能。测试结果显示,将高低温试验箱温度设置为 -40 °C 时,尽管试验箱内温度在 10 min 内由 25 °C(室温)骤降至 -40 °C,然而通过铝盒外壁放置的热敏电阻测得铝盒内的温度下降得非常缓慢,最终经过长达 3 h 后温度才由 25 °C 降至接近 -40 °C。这表明为光学模块创造的“恒温”微环境有效缓解了环境温度的剧烈变化。为避免 NRPS 等光纤器件在 -10 °C 以下性能指标恶化对锁模自启动功能可能的影响,在铝盒底部外侧与保温材料之间安装了加热膜(功率为 50 W,可设置开启温度),当环境温度低于 -10 °C 时,利用加热膜将铝盒加热至正常工作温度范围即可保持激光器的锁模自启动功能。

激光器机箱由铝板经铣削加工制作而成,分为上下两层。上层安装“恒温”微环境铝盒光学模块,下层安装泵浦源、锁定电路等电子学模块,如图 3(b)所示。选用符合工业级高低温测试标准的电子学元器件,其工作温度范围为 -40 °C 至 85 °C,故不再对光学模块和

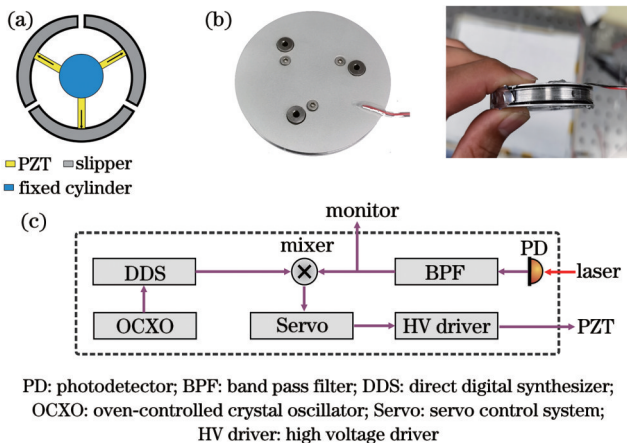


图 2 激光器重复频率的锁定。(a) PZT 频率调谐机构示意图;(b) PZT 实物照片;(c)重复频率锁定原理示意图  
Fig. 2 Repetition-rate-locking of the laser. (a) Diagrammatic sketch of PZT frequency tuning mechanism; (b) photo of the PZT; (c) schematic diagram of repetition-rate-locking principle

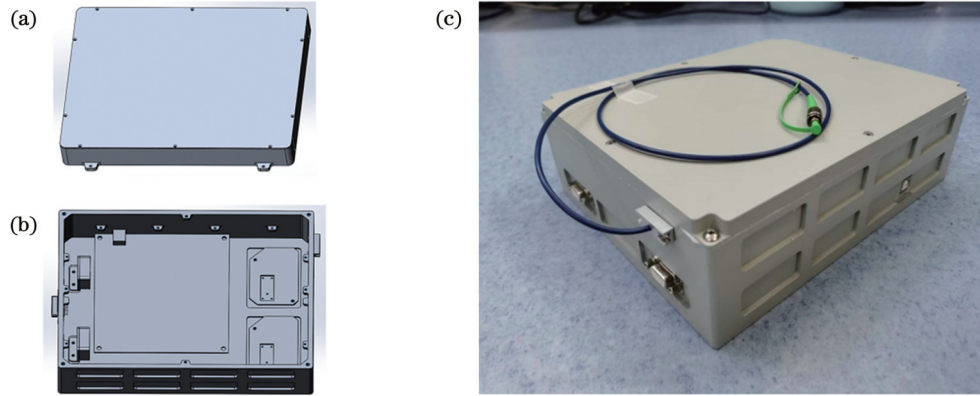


图3 皮秒光纤激光器样机。(a)光学模块的铝盒结构;(b)电子学模块的结构布局;(c)样机实物照片

Fig. 3 Prototype of picosecond fiber laser. (a) Structural diagram of aluminum box for optical module; (b) structure layout of the electronic module; (c) photo of the developed prototype

电子学部分进行主动控温。所有电子学元器件均机械固定至铝质机箱底部,以抑制外部环境振动的影响。图3(c)为激光器集成样机的照片。该样机采用PM 980保偏跳线输出,配有电源、监测和控制接口,尺寸为 $25\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 7\text{ cm}$ ,质量仅为 $3\text{ kg}$ 。

### 3 测试结果与讨论

#### 3.1 室温测试

首先在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 室温环境下测试激光器样机的性能。

结果表明,Figure-9光纤激光器具有优良快速锁模自启动功能,单脉冲稳定运转对应的泵浦功率区间为 $60\sim 70\text{ mW}$ 。图4为MOPA激光器输出单脉冲特性测试结果。图4(a)是测得的输出脉冲的时域波形,可见,相邻脉冲间隔约为 $100\text{ ns}$ ,对应的重复频率约 $10\text{ MHz}$ 。图4(b)是测得的强度自相关迹及其高斯拟合结果,可见,输出脉冲的脉宽约为 $21\text{ ps}$ 。图4(c)是测得的输出脉冲光谱,可见,脉冲中心波长位于 $1064\text{ nm}$ 处, $3\text{ dB}$ 带宽为 $0.2\text{ nm}$ 。

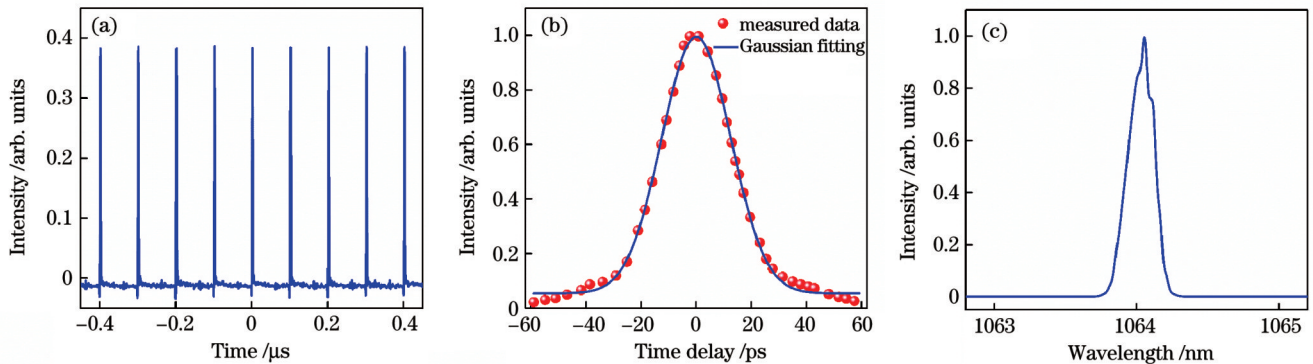


图4 激光器输出脉冲特性。(a)脉冲序列;(b)脉冲强度自相关曲线(其中点为测量值,实线为其高斯拟合);(c)激光脉冲光谱

Fig. 4 Output pulse characteristics of the laser. (a) Measured pulse train; (b) pulse intensity autocorrelation trace (points for the measured data, line for the Gaussian fitting); (c) measured laser pulse spectrum

室温环境下,可锁定激光器样机的重复频率至 $10049313\text{ Hz}$ 。图5(a)是利用已锁定至铷原子钟上的频率计数器在 $1\text{ s}$ 采样时间下测得的重复频率随时间的变化。可见,在 $10\text{ h}$ 的测试时间内,重复频率波动范围小于 $7.5\text{ mHz}$ ,对应的标准偏差为 $0.9\text{ mHz}$ 。由图5(a)所示数据可以计算出锁定后重复频率不稳定度的Allan方差,如图5(b)所示。可见,对应于 $1\text{ s}$ 、 $10\text{ s}$ 、 $1000\text{ s}$ 的重复频率不稳定性分别为 $2.1 \times 10^{-11}$ 、 $8.5 \times 10^{-12}$ 和 $3.6 \times 10^{-11}$ ,长期(大于 $10\text{ s}$ )稳定性下降的原因在于所用频率参考长期稳定性( $6 \times 10^{-12}$ @ $100\text{ s}$ )不高。室温环境下激光器样机的重复频率可保持长期锁定(实测 $1.5\text{ d}$ 内未失锁)。

#### 3.2 高低温测试

利用高低温试验箱对激光器样机进行测试。测试时,先将激光器样机放置到已设置确定温度的高低温试验箱内,静置 $3\text{ h}$ 后开机测试。当设置温度处于 $-10\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内的任意温度时,激光器样机均可快速实现锁模自启动。当设置温度低于 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 时,激光器样机不能实现锁模自启动,这主要是由温度在 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 以下时NRPS等光纤器件性能恶化导致的。但是,开启加热膜并预热 $1\text{ h}$ 后,就可将铝盒光学模块加热至正常的工作温度范围内,从而使得激光器样机恢复快速锁模自启动功能。利用该方法,激光器样机在 $-40\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内均可实现快速锁模自启动功能

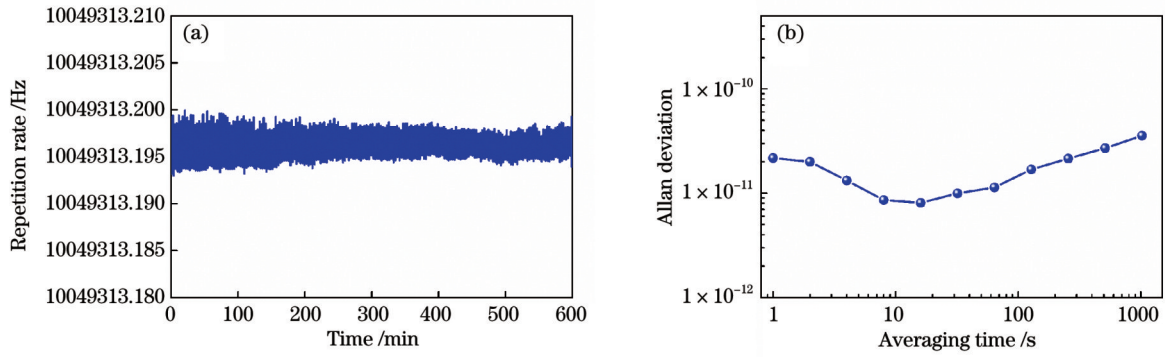


图5 重复频率锁定结果。(a)重复频率随时间的变化;(b)由图5(a)中数据计算的重复频率不稳定度的Allan方差  
Fig. 5 Measured results when the repetition rate is locked. (a) Measured repetition rate varies with time; (b) Allan variance of repetition-rate instability calculated with measured data in Fig. 5(a)

(低于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时泵浦LD无法工作),只是加热膜的设置温度不同会导致激光器的重复频率不同。例如,当将加热膜的设置温度定为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高低温试验箱温度下,自由运转激光器样机的重复频率稳定在 $10049500\text{ Hz}$ 附近。这表明对激光器样机光学模块创建的“恒温”微环境能有效抑制外界环境温度的影响。

此外,测试了高低温环境下激光器样机重复频率的锁定结果。图6(a)为不同温度下锁定后激光器重复频率随时间的变化。可见,当高低温试验箱温度分别设定在 $-40$ 、 $0$ 、 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,激光器样机(重复频率分别锁定到 $10049457$ 、 $10049287$ 、 $10048799\text{ Hz}$ )在 $30\text{ min}$ 测试时间内的重复频率波动均小于 $15\text{ mHz}$ 。图6(b)为根据图6(a)数据计算得到的重复频率不稳定度的

Allan方差。在 $-40$ 、 $0$ 、 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 测试温度下, $1\text{ s}$ 不稳定度的Allan方差分别为 $4.3\times 10^{-11}$ 、 $5\times 10^{-11}$ 和 $2.8\times 10^{-11}$ ,Allan方差之间的微小差异主要由锁定电路温度敏感性所致。该测试结果还表明,当将激光器样机放置在高低温试验箱内时,其在 $-40\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围的任意确定温度下均可保持长期的重复频率锁定状态。显然,这得益于高低温试验箱所创造的稳定的环境温度,但同时也表明对激光器样机光学模块创建“恒温”微环境能有效抑制外界环境温度的影响,从而使得PZT频率调谐量在外界极端温度下足以补偿“恒温”微环境内的温度波动造成的重复频率抖动。由于光学模块“恒温”微环境的实际温度随测试温度而变化,因此,在不同的测试温度下,激光器样机的中心波长和平均功率等参数稍有不同。

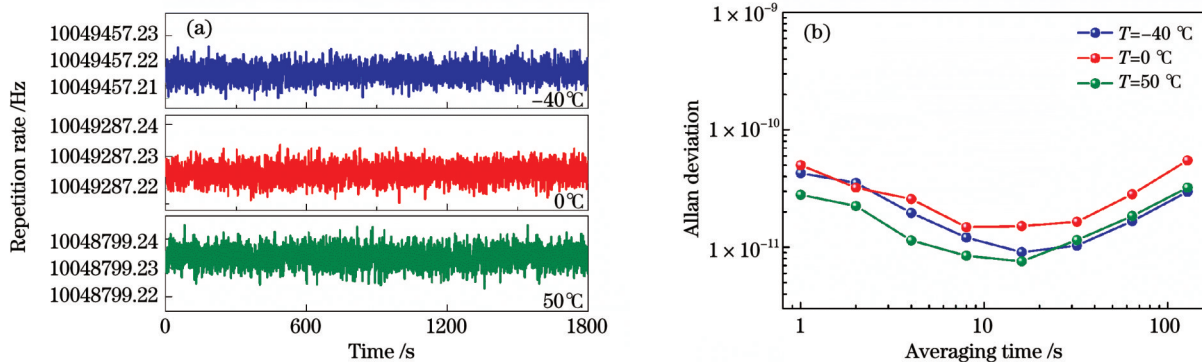


图6  $-40$ 、 $0$ 、 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下重复频率的锁定结果。(a)重复频率随时间的变化;(b)由图6(a)中数据计算的重复频率不稳定度的Allan方差  
Fig. 6 Measured results when the repetition rate is locked at temperature of  $-40$ 、 $0$  and  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectively. (a) Repetition rate as a function of time; (b) Allan variance of repetition-rate instability calculated with measured data in Fig. 6(a)

### 3.3 振动测试

采用电动振动台评估了激光器样机在振动环境下的性能,如图7(a)所示。振动台的振动参数设置为:初始振动频率和振动幅度分别为 $5\text{ Hz}$ 和 $25.4\text{ mm}$ ,振动加速度恒为 $15\text{ m/s}^2$ ( $1.5g$ ),经 $400\text{ s}$ 后振动频率增加至 $200\text{ Hz}$ ,之后保持振动频率和振动幅度不变。振动测试时,先将激光器样机固定在电动振动台,在 $X$ 、 $Y$ 和 $Z$ 三个方向三维振动 $30\text{ min}$ 后开启激光器样机,结

果表明,样机保持着优良快速锁模自启动和重复频率锁定功能。然后,将重复频率处于锁定状态下的激光器样机固定至电动振动台,依次在 $X$ 、 $Y$ 和 $Z$ 三个方向施加振动,分别记录重复频率随时间的变化,结果如图7(b)所示,其中频率计数器的采样时间设置为 $0.1\text{ s}$ 。当振动施加在 $Y$ 方向和 $Z$ 方向时,锁定后的重复频率的波动约为 $20\text{ mHz}$ ,高于图5(a)所示的无振动时的结果,这反映了环境振动对光纤激光器性能的影响。当

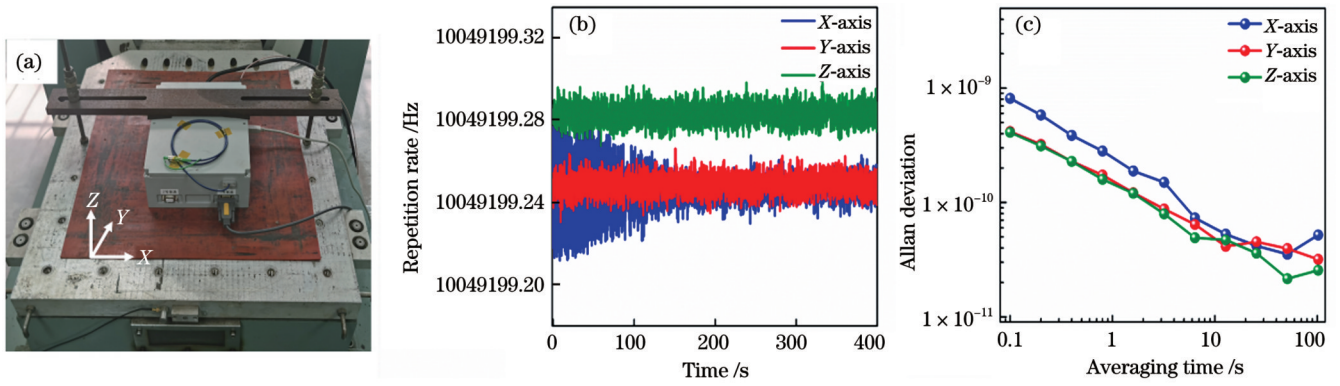


图 7 振动环境下的激光器测试结果。(a)振动环境测试场景照片;(b)三维方向上分别施加振动时测得的重复频率随时间的变化;(c)由图 7(b)中数据计算的重复频率不稳定度的 Allan 方差

Fig. 7 Measured results when the laser operates in vibration environment. (a) Photo of the vibration environment scene; (b) measured repetition rate as functions of time when the vibration is superimposed on each of the three coordinate axes; (c) Allan variance of repetition-rate instability calculated with measured data in Fig. 7(b)

振动施加在 X 方向时,特别是在低频段,重复频率的波动高达 60 mHz,这可能是由 Figure-9 光纤激光器中的 Sagnac 干涉仪对该方向的低频振动敏感导致的<sup>[22]</sup>。图 7(c)给出了施加 X、Y 和 Z 三个方向的振动后重复频率不稳定度的 Allan 方差,可见,尽管环境振动会影响重复频率的锁定效果,但三个方向上 1 s 的 Allan 方差仍然优于  $2.5 \times 10^{-10}$ 。

振动测试结果表明,本课题组研制的激光器样机具有可搬运的特点,并且,其在 1.5g 的振动环境或运动平台上能够保持重复频率的高精度锁定。

### 3.4 室外测试

在室外环境下测试了激光器样机的性能。测试地点处在六层建筑物楼顶,测试场景如图 8(a)所示,周围交通繁忙,人员活动密集。测试季节为 7 月中旬,连续测试了数天。图 8(b)为采用数字温度计(DS18B20)记录的测试当天多云天气下的温度变化,从 9:00 至 22:00 的 13 个小时内,最高和最低温度分别为 40 °C 和 26 °C(测试处安装了一块棉布户外天幕,以防止高温损坏测试仪器)。该温度变化范围也能反映该季节的昼夜温度变化。

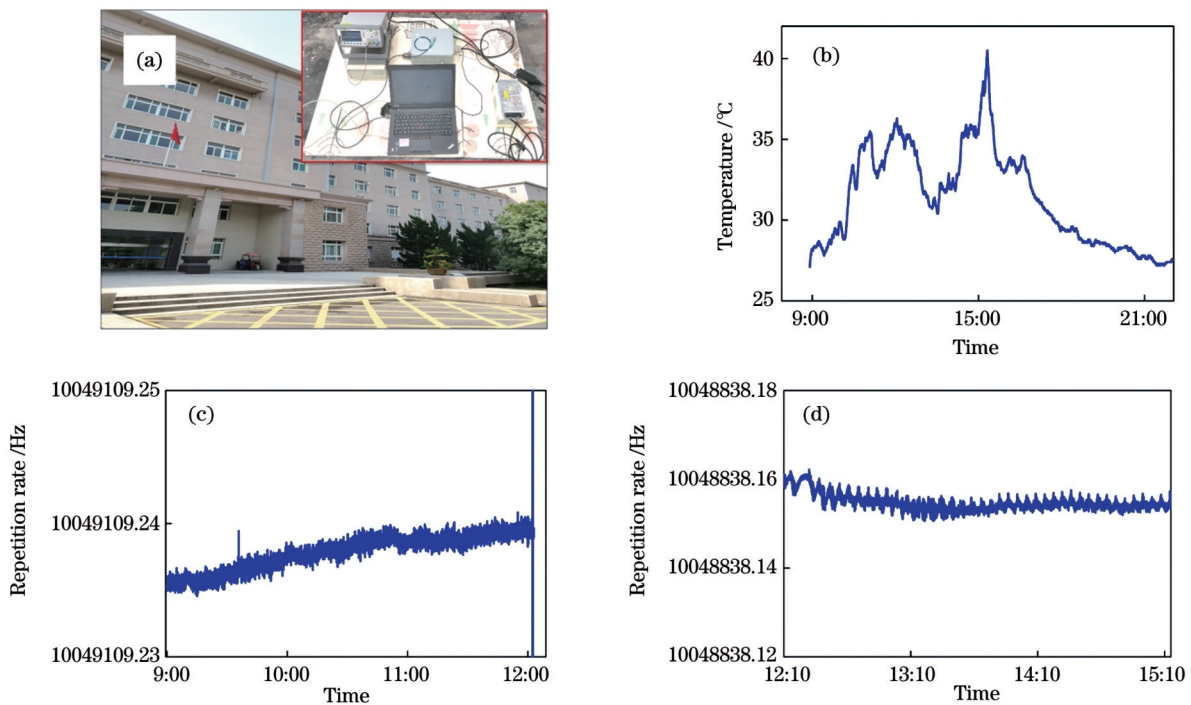


图 8 室外环境下的激光器测试结果。(a)测试场景照片;(b)由温度计记录的测试环境温度;(c)9:00 至 12:00 锁定的重复频率随时间的变化;(d)12:10 至 15:10 锁定的重复频率随时间的变化

Fig. 8 Test results of the laser operating in the outdoor environment. (a) Photo of the test scene; (b) recorded temperature of the test site measured with the thermometer; (c) locked repetition rate as a function of time from 9:00 to 12:00; (d) locked repetition rate as a function of time from 12:10 to 15:10

上午 9:00 开启激光器进行测试,自由运转下的激光器重复频率在 10049300 Hz 附近,对 PZT 施加 55 V 偏压后将激光器重复频率锁定至 10049109 Hz。图 8(c) 是激光器样机锁定后重复频率随时间的变化。可见,在 3 h 内(9:00 至 12:00),尽管环境温度由 26 °C 上升至 36 °C[如图 8(b)所示],样机的重复频率依然能保持锁定状态,重复频率波动为 8 mHz。这得益于样机光学模块所处“恒温”微环境有效抑制了环境温度的大幅上升,使得 PZT 频率调谐量可以补偿“恒温”微环境内的温度波动造成的重复频率抖动。但是,锁定 3 h 后(12:00 时),重复频率失锁。这是由于外界温度不断升高导致无主动温控的光学模块内部温度持续升高,光纤激光器的腔长持续变长,如此一来,在 3 h 前较低温度下设置的 PZT 偏压已不能使 PZT 保持有效的频率调谐功能,最终导致样机的重复频率失锁。失锁后(36 °C),激光器的自由运转重复频率约为 10048950 Hz,设置 30 V 的 PZT 偏压可将激光器样机的重复频率重新锁定至 10048838 Hz。样机首先经历 35 °C 高温(12:10),之后降温至 30 °C(13:40),再升温至 40 °C(15:00),在 10 °C 温差的环境下保持锁定 3 h,如图 8(d) 所示。锁定后的重复频率波动约为 12 mHz,图中曲线出现的类似调制波形的现象可能是由设置的比例-积分-微分(PID)参数不稳定导致的。

室外测试结果表明,本课题组研制的无附加温控激光器样机可抵御约 10 °C 的环境温度波动,实现重复频率锁定功能。尽管重复频率锁定时间约为 3 h,但这足以满足大多数室外实验对激光器的应用需求。

## 4 结 论

本课题组设计、研制了一种可满足室外环境应用的重复频率锁定的皮秒锁模光纤激光器,该激光器可以产生典型应用场景所需的 10 MHz 重复频率和 20 ps 脉宽的脉冲序列。通过选用 Figure-9 全保偏光纤激光器结构,并通过优化腔结构参数调控腔内非线性,确保了激光器的快速锁模自启动功能。采用低导热材料隔热封装并辅以低温加热方法,为光学模块创建了“恒温”微环境,大幅松弛了复杂环境下锁定重复频率对频率调谐执行器件频率调谐量的要求,从而使得采用 PZT 能构建出兼顾频率调谐量和调谐精度双重要求的频率调谐执行器件。根据上述设计方案,本课题组研制出了尺寸为 25 cm×20 cm×7 cm、质量为 3 kg 的具有重复频率锁定功能的皮秒锁模光纤激光器样机,其中的高精度 PZT 频率调谐执行器件的频率调谐量可达 400 Hz。在室温和极端温度(-40 °C 或 50 °C)环境下,该样机都具有快速锁模自启动和重复频率长期高精度锁定功能,而且在 1.5g 加速度振动环境下能保持这两个重要功能。夏季室外测试结果表明,该激光器样机能快速自启动锁模,重复频率锁定功能可抵

御高温环境下的 10 °C 温度波动。这种重复频率锁定的皮秒脉冲光纤激光器可望在众多室外复杂环境下发挥重要作用。

## 参 考 文 献

- [1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.
- [2] Kanzelmeyer S, Sayinc H, Theeg T, et al. All-fiber based amplification of 40 ps pulses from a gain-switched laser diode[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7914: 791411.
- [3] Nodop D, Limpert J, Hohmuth R, et al. High-pulse-energy passively Q-switched quasi-monolithic microchip lasers operating in the sub-100-ps pulse regime[J]. Optics Letters, 2007, 32(15): 2115-2117.
- [4] 张海鹏, 徐金龙, 黄海涛, 等. 透射式 SESAM 实现 Nd:YAG 连续波锁模皮秒脉冲激光[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2400-2403.  
Zhang H K, Xu J L, Huang H T, et al. Passively CW mode-locked Nd:YAG picosecond laser with a partially reflective semiconductor saturable-absorber mirror[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9): 2400-2403.
- [5] 石宇航, 程昭晨, 彭志刚, 等. 21 MHz~100 kHz 重复频率亚皮秒 NALM 锁模光纤激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501013  
Shi Y H, Cheng Z C, Peng Z G, et al. Sub-picosecond NALM mode-locked fiber laser with 21 MHz-100 kHz repetition rate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501013.
- [6] Lu Q, Ma J D, Duan D, et al. Reducing the pulse repetition rate of picosecond dissipative soliton passively mode-locked fiber laser[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2809-2816.
- [7] Boivinet S, Lecourt J B, Hernandez Y, et al. All-fiber 1 μm PM mode-lock laser delivering picosecond pulses at sub-MHz repetition rate[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(22): 2256-2259.
- [8] Duan D, Lu Q, Wu B, et al. 848 kHz repetition-rate narrowband dissipative soliton ps-pulsed Figure-9 fiber laser[J]. Optics Express, 2021, 29(15): 23967-23975.
- [9] Lee J, Lee K, Jang Y S, et al. Testing of a femtosecond pulse laser in outer space[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 5134.
- [10] Lezius M, Wilken T, Deutsch C, et al. Space-borne frequency comb metrology[J]. Optica, 2016, 3(12): 1381-1387.
- [11] 康民强, 邓颖, 王方, 等. 皮秒脉冲激光远程测距应用探讨及系统初步设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 102203.  
Kang M Q, Deng Y, Wang F, et al. Discuss and design of picosecond laser pulse applied in long-distance ranging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 102203.
- [12] Vainshtein S, Kostamovaara J, Lantratov V, et al. High-power picosecond laser diodes based on different methods of fast gain control for high-precision radar applications[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6593: 65930B.
- [13] Steinmetz T, Wilken T, Araujo-Hauck C, et al. Laser frequency combs for astronomical observations[J]. Science, 2008, 321(5894): 1335-1337.
- [14] 吴浩煜, 时雷, 马挺, 等. 基于飞秒光纤激光器的光频率梳设计与研制技术[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0601008.  
Wu H Y, Shi L, Ma T, et al. Design and development technique for optical frequency comb based on femtosecond fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0601008.
- [15] Miao R L, Zhang C X, Zheng X, et al. Repetition rate locked single-soliton microcomb generation via rapid frequency sweep and sideband thermal compensation[J]. Photonics Research, 2022, 10(8): 1859-1867.
- [16] Baumgartl M, Abreu-Afonso J, Diez A, et al. Environmentally stable picosecond Yb fiber laser with low repetition rate[J]. Applied Physics B, 2013, 111(1): 39-43.

- [17] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics[M]. 5th ed. Oxford: Academic, 2013.
- [18] Lu Q, Ma J D, Duan D, et al. High fidelity picosecond pulse fiber amplification with inter-stage notch filter[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(21): 6082-6088.
- [19] Inaba H, Akimoto Y, Tamura K, et al. A single-frequency and single-polarization fiber ring laser using a 5-GHz fiber Bragg grating[J]. Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics), 1999, 82(5): 21-29.
- [20] 张自嘉, 施文康, 高侃, 等. 热光系数与长周期光纤光栅的温度灵敏度研究[J]. 光学技术, 2004, 30(5): 525-528.
- Zhang Z J, Shi W K, Gao K, et al. Thermo-optic coefficient and temperature sensitivity of long-period fiber gratings[J]. Optical Technique, 2004, 30(5): 525-528.
- [21] 姜曼, 肖虎, 周朴, 等. 高功率、低量子亏损同带抽运掺镱光纤放大器[J]. 物理学报, 2013, 62(4): 044210.
- Jiang M, Xiao H, Zhou P, et al. High power and low quantum-defect Yb-doped fiber amplifier based on tandem pumping[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(4): 044210.
- [22] Wada K J, Narui H, Yamamoto D, et al. Balanced polarization maintaining fiber Sagnac interferometer vibration sensor[J]. Optics Express, 2011, 19(22): 21467-21474.

## Repetition-Rate-Locked Picosecond Pulsed Fiber Laser for Operating in Outdoor Environment

Yao Bo<sup>1,2</sup>, Duan Dian<sup>1</sup>, Dou Xian'an<sup>2,3</sup>, Chen Yujun<sup>1,4</sup>, Liu Xiaobing<sup>1</sup>, Mao Qinghe<sup>1,2,4\*</sup>

<sup>1</sup>Anhui Provincial Key Laboratory of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

<sup>2</sup>Anhui Laboratory of Advanced Laser Technology, Hefei 230037, Anhui, China;

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, Anhui, China;

<sup>4</sup>School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China

### Abstract

**Objective** Picosecond laser pulses, characterized by their high peak power and spectral purity, hold significant importance in numerous applications across various fields. Mode-locked fiber lasers, with their compact structure, maintenance-free operation, and superior anti-interference ability, have emerged as one of the most vital sources of picosecond pulse lasers. Among these, SESAM and Figure-9 mode-locked fiber lasers have attracted significant attention owing to their exceptional self-start performance. Furthermore, in precision measurement applications, such as lidar and precision distance measurement, it is imperative to maintain a locked repetition rate of the laser pulse. However, practical engineering applications present novel challenges due to their complex environments, which include temperature changes ranging from  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  across different seasons, violent vibrations during transportation and usage, and stringent requirements concerning volume, weight, and power consumption. These conditions pose challenges to maintaining a locked repetition rate of the picosecond mode-locked fiber laser while ensuring the self-start function. Consequently, the design and development of a picosecond fiber laser with rapid self-start and repetition-rate-locking capabilities becomes a significant issue that warrants further exploration and research.

**Methods** The configuration of the Figure-9 fiber laser was chosen, and the intracavity nonlinearity was optimized to realize the fast self-start mode-locking function for the laser. A “constant temperature” local-environment for the optical module was established by adiabatically packaging with low-thermal-conductivity materials. This approach significantly relaxed the requirement of the tuning range for the piezoelectric transducer (PZT) frequency tuning mechanism to lock the repetition rate of the fiber laser operating in the outdoor environment. Based on these advancements, a prototype mode-locked fiber laser weighing only 3 kg was designed and developed. This prototype showcased a typical repetition rate and pulse width of 10 MHz and 20 ps, respectively.

**Results** At room temperature, the measured pulse train, which displays a repetition rate of 10 MHz, is illustrated in Fig. 4(a). The intensity autocorrelation trace indicates the pulse width to be 20 ps [see Fig. 4(b)]. The pulse's center wavelength is 1064 nm with a 3 dB bandwidth of 0.2 nm (Fig. 4c). The repetition rate's fluctuation is less than 7.5 mHz over a 10 h test period [see Fig. 5(a)]. The corresponding Allan variance of repetition-rate instability corresponds to  $2.1 \times 10^{-11}$ @1 s,  $8.5 \times 10^{-12}$ @10 s, and  $3.6 \times 10^{-11}$ @1000 s [see Fig. 5(b)]. Repetition rates as a function of time are depicted in Fig. 6(a) when the repetition rates are locked at  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectively. The fluctuations of the repetition rates remain less than 15 mHz over a 30 min test period. Correspondingly, the Allan variance of repetition-rate instability is  $4.3 \times 10^{-11}$ ,  $5 \times 10^{-11}$ , and  $2.8 \times 10^{-11}$  for 1 s at  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectively [see Fig. 6(b)]. Fluctuations of repetition rates as functions of time are illustrated in Fig. 7(b) when the vibration is superimposed on



each of the three coordinate axes, and the Allan variance for 1 s across these axes remains better than  $2.5 \times 10^{-10}$  [see Fig. 7(b)]. In an outdoor environment, the prototype's repetition rate can be locked for more than 3 h [see Fig. 8(c) and Fig. 8(d)], suggesting that the prototype can withstand temperature fluctuations of approximately  $10^\circ\text{C}$  in an outdoor setting.

**Conclusions** A repetition-rate-locked picosecond pulsed fiber laser, designed for operation in outdoor environments, has been reported. The configuration of the Figure-9 fiber laser was chosen, and the intracavity nonlinearity was optimized to realize a fast self-start mode-locking function for the laser. A prototype of the mode-locked fiber laser, weighing only 3 kg and typically exhibiting a repetition rate and pulse width of 10 MHz and 20 ps respectively, was developed. Under varying conditions, such as room temperature, extreme ambient temperatures ( $-40^\circ\text{C}$  or  $50^\circ\text{C}$ ), and environments experiencing vibrations of 1.5g, the prototype still managed to maintain self-start mode-locking and repetition-rate-locking. Furthermore, the prototype's repetition-rate-locking function demonstrated resistance to a  $10^\circ\text{C}$  ambient temperature fluctuation when operating in high-temperature outdoor environments during summer.

**Key words** lasers; mode-locked laser; picosecond pulse; repetition-rate-locking; ambient temperature