

激光与光电子学进展

基于 45° 倾斜光纤光栅的光纤激光频率梳(特邀)

黄梓楠¹, 黄千千¹, 田昊晨^{2***}, 闫志君^{3**}, 邹萌³, 孙敬华⁴, 顾澄琳⁵, 王开¹,徐子硕¹, 李卫浙¹, 戴礼龙¹, 梁新栋⁶, 牟成博^{1*}¹上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海先进通信与数据科学研究院,

特种光纤与先进通信国际合作联合实验室, 上海 200444;

²中国计量科学研究院, 北京 100029;³华中科技大学光学与电子信息学院下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074;⁴东莞理工学院电信工程与智能化学院, 广东 东莞 523808;⁵华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062;⁶浙江省引力波精密测量重点实验室国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024

摘要 利用 45° 倾斜光纤光栅(45°-TFG)作为光纤型起偏器, 搭建了一台高可靠性高稳定性的掺铒锁模光纤激光器, 并以此为基础实现了重复频率 f_{rep} 和载波包络偏移频率 f_{ceo} 的精确锁定。当泵浦功率为 228 mW 时, 基于 45°-TFG 的锁模激光振荡器可实现 3 dB 光谱带宽为 60.4 nm、脉冲宽度为 68 fs 的超短脉冲输出, 在 12 h 内功率的均方根稳定性达到 0.033%, 且在较大的泵浦范围内均能维持较好的展宽锁模状态。经过自主搭建的非线性脉冲放大、超连续谱产生以及 $f-2f$ 自参考拍频干涉光路, 获得了信噪比为 32 dB 的 f_{ceo} 信号。最后通过搭建基于锁相环的主动反馈控制电路, 将 f_{rep} 和 f_{ceo} 信号溯源至一台 GPS 时频系统, 最终测得 f_{rep} 和 f_{ceo} 信号归一化后在 1 s 门时间内频率稳定度为 2.38×10^{-12} 和 6.41×10^{-16} 。这是首次实现基于 45°-TFG 的光纤激光频率梳, 表明了基于 45°-TFG 的锁模光纤激光器在实际应用中的潜力。

关键词 锁模光纤激光器; 光纤光栅; 非线性偏振旋转; 光纤激光频率梳

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232492

Fiber Laser Frequency Comb Based on a 45° Tilted Fiber Grating (Invited)

Huang Zinan¹, Huang Qianqian¹, Tian Haochen^{2***}, Yan Zhijun^{3**}, Zou Meng³,Sun Jinghua⁴, Gu Chenglin⁵, Wang Kai¹, Xu Zishuo¹, Li Weixi¹, Dai Lilong¹,Liang Xindong⁶, Mou Chengbo^{1*}

¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²National Institute of Metrology, China, Beijing 100029, China;

³National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

⁴School of Electronic Engineering and Intelligentization, Dongguan University of Technology, Dongguan, 523808, Guangdong, China;

⁵State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

⁶Key Laboratory of Gravitational Wave Precision Measurement of Zhejiang Province, Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou 310024, Zhejiang, China

Abstract A highly reliable and stable erbium-doped mode-locked fiber laser was constructed using a 45°-tilted fiber grating (45°-TFG) as a fiber polarizer. Based on this, precise signal stabilization of the repetition frequency f_{rep} and carrier-

收稿日期: 2023-11-13; 修回日期: 2023-12-01; 录用日期: 2023-12-05; 网络首发日期: 2023-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(62135007, 61975107)、广东省基础与应用基础研究基金区域联合基金重点项目(2020B1515120041)、之江实验室开放课题(K2022MH0AB01)、中国科学院空间主动光电技术重点实验室开放课题(2021-ZDKF-01)

通信作者: *moucl@shu.edu.cn; **yanzhijun@hust.edu.cn; ***haochentian@nim.ac.cn

envelope offset frequency f_{ceo} was achieved. When the pump power is 228 mW, the mode-locked laser oscillator based on a 45° -TFG can achieve an ultra-short pulse output of 3 dB with a spectral bandwidth of 60.4 nm and a pulse width of 68 fs. The root mean square stability of the power reaches 0.033% within 12 hours, and it can maintain a good stretched mode-locked state over a large pump range. After self-built chirped pulse amplification, super-continuum spectrum generation, and f - $2f$ self-reference beat interference optical path, f_{ceo} signal with a signal-to-noise ratio of 32 dB was obtained. Finally, by building an active feedback control circuit based on a phase-locked loop, the f_{rep} and f_{ceo} signals were traced back to a GPS time-frequency system, and the frequency instability of the f_{rep} and f_{ceo} signals was measured to be 2.38×10^{-12} and 6.41×10^{-16} within an average time of 1 second. This is the first implementation of a fiber laser frequency comb based on a 45° -TFG, indicating the potential of a 45° -TFG based mode-locked fiber laser in practical applications.

Key words mode-locked fiber laser; fiber grating; nonlinear polarization rotation; optical frequency comb

1 引言

作为连接微波频率和光学频率的桥梁,光学频率梳的发明使得光学频率的精确测量取得了革命性的突破。如今光学频率梳作为光学领域的重要工具,已经从最初精密光学计量、光学原子钟、高分辨率光谱学、基本物理常数的精确测定等基础研究领域,逐步拓展至高带宽光通信、精密测距、超稳微波产生等高新技术领域,并在地外行星探测、高精度时频传递、量子光学等前沿领域显示出重要的应用潜力^[1-6]。作为光学频率梳的核心器件,飞秒锁模激光器决定了光频梳系统的性能。在发展初期通常依赖于钛宝石固体锁模激光器来构建光学频率梳,随着光纤技术的成熟和发展,以及飞秒光纤激光器小型化、抗干扰、成本以及维护方面的优势,光纤激光频率梳在近年来逐渐成为主流^[3]。光学频率梳的梳齿方程为 $f_n = nf_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}$, 其中, f_{rep} 表示激光输出脉冲的重复频率, n 表示纵模序数, f_{ceo} 表示载波包络偏移频率^[4]。通过光学频率梳梳齿方程可得,光学频率梳的实现关键在于同时实现对 f_{rep} 和 f_{ceo} 两个自由度的锁定。基于材料型可饱和吸收体、非线性放大环形镜(NALM)和非线性偏振旋转(NPR)等不同锁模机制的光纤激光器陆续被用作光学频率梳的振荡器^[3]。尽管 NPR 技术相对于材料型可饱和吸收体和 NALM 技术存在对环境变化具有高度敏感性的缺点,但调制深度高、响应时间快、损伤阈值高和良好的噪声特性等优势,使其成为实验室环境应用中的理想光源^[7-10]。

起偏器作为 NPR 技术的关键器件,在实现光纤化的过程中得到了众多关注。其中 45° 倾斜光纤光栅 (45° -TFG) 特殊的倾斜结构打破了光纤的圆对称性,可以实现偏振相关的模式耦合,是最具有代表性的光纤型偏振相关器件之一。2000 年 45° -TFG 首次被证明可以用作一种光纤偏振计^[11],2005 年英国阿斯顿大学的 Zhou 等^[12]在掺铒光纤上刻写了在 1550 nm 处具有 33 dB 偏振消光比的 45° -TFG,工作范围可达 100 nm,使 45° -TFG 用于锁模光纤激光器成为可能。与其他商用光纤型起偏器相比, 45° -TFG 具有高偏振相关损耗(PDL)、低插入损耗、宽带响应、灵活的波长

设计性以及简单的制备方式等优势,且可以在诸多类型特种光纤内进行刻写。自 2010 年 Mou 等^[13]利用 45° -TFG 首次实现 NPR 锁模光纤激光器以来, 45° -TFG 已经在不同波段的光纤激光器中作为关键功能器件实现了不同工作模式的锁模脉冲输出^[14-22]。然而,尽管已经有大量基于 45° -TFG 锁模光纤激光器的研究,但仍集中在飞秒激光种子源的研制阶段,并未将其用于实际激光应用系统中。因此,为了进一步探索基于 45° -TFG 锁模光纤激光器的应用潜力,本文利用基于 45° -TFG 的展宽脉冲锁模光纤激光器作为种子源,自主搭建了一套光纤激光频率梳系统,实现了重复频率 f_{rep} 和载波包络偏移频率 f_{ceo} 的探测和锁定。这项研究探明了 45° -TFG 在全光纤激光频率梳中应用的可行性,为未来将 45° -TFG 刻写在不同类型特种光纤,研制更加先进、结构更加紧凑的锁模光纤激光器,以及低成本满足多种激光应用需求奠定了坚实的基础。

2 实验装置

基于 45° -TFG 的光纤激光频率梳的实验结构示意图如图 1 所示,主要由图 1(a)基于 45° -TFG 的锁模光纤激光振荡器、图 1(b)非线性脉冲放大光路、图 1(c)超连续谱产生及 f - $2f$ 自参考拍频探测光路、图 1(d)重复频率 f_{rep} 的锁定电路和图 1(e)载波包络偏移频率 f_{ceo} 的锁定电路五个部分组成。

如图 1(a)所示,锁模光纤激光振荡器采用基于 45° -TFG 的 NPR 锁模机制。在之前的研究中发现, 45° -TFG 的 PDL 越高,在激光器中越容易得到锁模阈值更低、脉宽更窄以及转换效率更高的激光输出^[23]。窄脉冲宽度和高转换效率通常意味着锁模激光器工作在近零的色散域和低腔内损耗的状态,而这二者是低噪声脉冲输出的前提。因此,使用具有高 PDL 的 45° -TFG 作为锁模关键器件,易于实现工作在近零色散域和低腔内损耗的激光输出,从而有利于减小振荡器的噪声,这是实现飞秒激光器重复频率与载波包络偏移频率锁定的重要基础。实验中采用具有较高 PDL 的 45° -TFG 与两个偏振控制器(PCs)共同形成 NPR 锁模结构。采用一台商用光矢量分析仪(LUNA

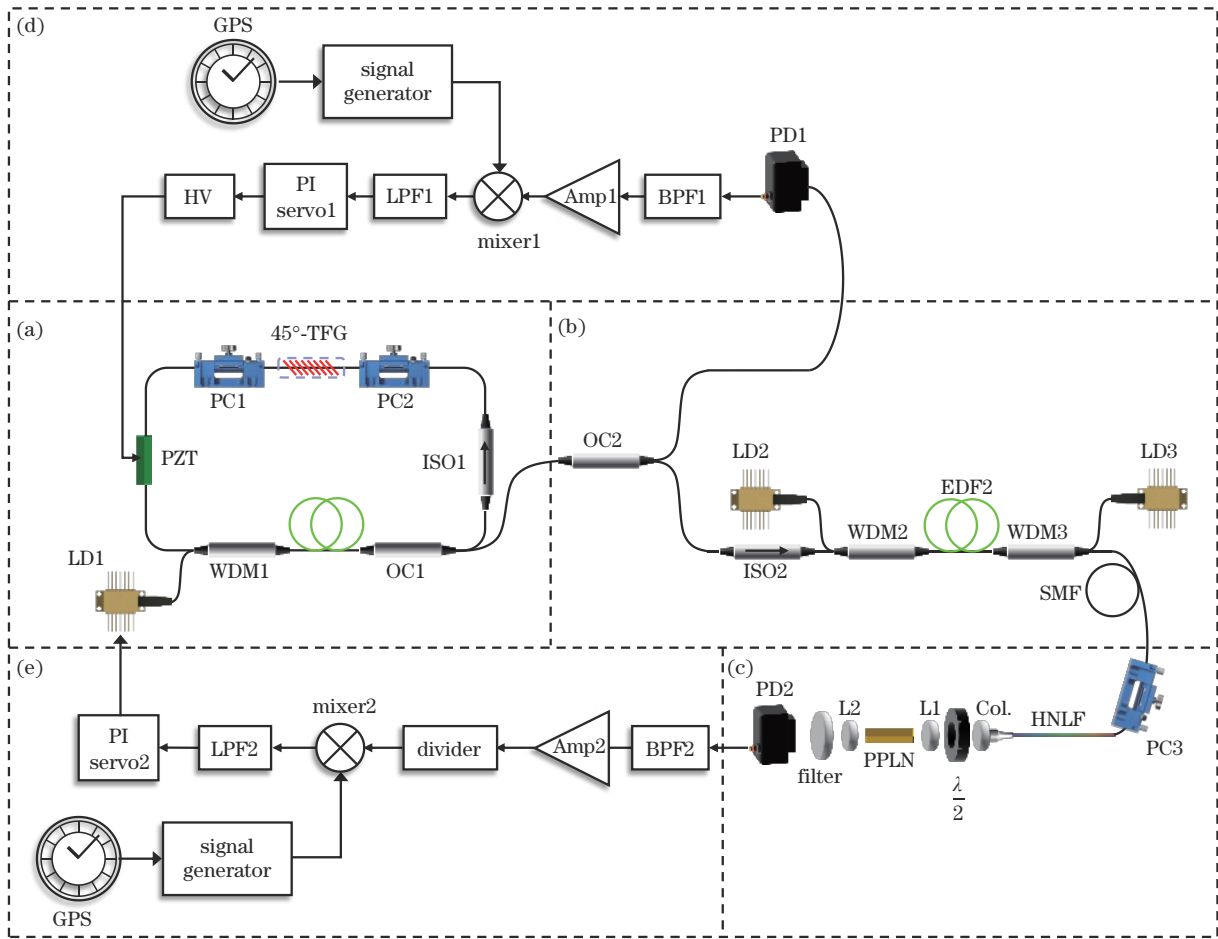


图 1 基于 45°-TFG 光纤激光频率梳系统结构示意图。(a) 基于 45°-TFG 的锁模光纤激光振荡器；(b) 脉冲放大光路；(c) 倍频程超连续谱产生及 $f-2f$ 自参考拍频探测光路；(d) 重复频率 f_{rep} 的锁定电路；(e) 载波包络偏移频率 f_{ceo} 的锁定电路
 Fig. 1 Schematic diagram of a 45°-TFG fiber laser frequency comb system. (a) Mode-locked fiber laser oscillator based on 45°-TFG; (b) pulse amplification; (c) octave supercontinuum spectrum generation and $f-2f$ interferometer; (d) stabilization circuit of f_{rep} ; (e) stabilization circuit of f_{ceo}

OVA5000) 对 45°-TFG 的偏振特性进行表征, 在两个正交偏振态下分别测量的最大和最小传输损耗谱如图 2(a) 所示, 对应的 PDL 和插入损耗如图 2(b) 所示。可以看出 PDL 在 1550 nm 处约为 35 dB, 在近 100 nm 范围内几乎均大于 30 dB, 具有宽带偏振特性。整体

插入损耗在 5.2 dB 左右, 包含了 s 光耦合至包层的近 3 dB 损耗。其中观察到的振荡波纹是由于 45°-TFG 将 s 光作为辐射模从纤芯耦合出去时光纤包层不是无限的, 辐射模在包层和空气之间的边界发生反射形成了包层模式振荡。这种振荡波纹在 45°-TFG 用于实

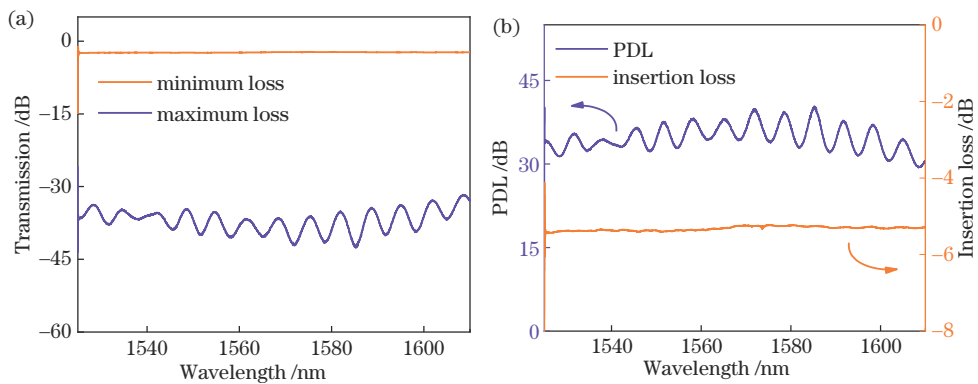


图 2 45°-TFG 的特性表征。(a) 45°-TFG 的最大和最小传输损耗；(b) 45°-TFG 的 PDL 和插入损耗
 Fig. 2 Characterization of 45°-TFG. (a) Maximum and minimum transmission loss of 45°-TFG; (b) PDL and insertion loss of 45°-TFG

现锁模光纤激光器的脉冲输出性能没有明显影响,可以通过将光栅浸入折射率匹配液中消除。一段长度为 115 cm 的掺铒光纤(EDF)作为增益介质,在 1550 nm 处二阶色散值约为 $+59.8 \text{ ps}^2/\text{km}$,吸收系数在 1530 nm 处为 80 dB/m。增益光纤由一台 974 nm 的半导体激光器(LD)通过一个 980/1550 nm 的波分复用器(WDM)提供泵浦。将一个分束比为 60:40 的光纤耦合器(OC)置于增益光纤后,将腔内 40% 的激光输出用于后续实现 f_{rep} 和 f_{ceo} 锁定。实验中控制耦合器与 EDF 相连接的尾纤较短,有利于在输出端获得较大的脉冲功率和较宽的光谱。一个偏振无关隔离器(ISO)用来确保腔内光信号单向传输。腔内除了具有正常色散的 EDF 外,其余均为在 1550 nm 处二阶色散值约为 $-22.8 \text{ ps}^2/\text{km}$ 的普通单模光纤(SMF)。为获得光谱较宽、无多脉冲且易于实现的展宽脉冲,经过实验反复优化,最终确定腔内 SMF 总长度为 289.6 cm。此时,谐振腔的总长度为 4.046 m,对应可计算净腔色散为 $+0.0027 \text{ ps}^2$ 。此外,为了通过对谐振腔长的反馈控制来进行 f_{rep} 信号锁定,将一个标称位移量为 20 μm 的压电陶瓷促动器(PZT)与腔内 SMF 进行黏附。

如图 1(b)所示,在基于 45° -TFG 的锁模激光振荡器输出后,通过一个分束比为 95:5 的耦合器 OC2 将输出光分为两路。由于处于 MHz 量级的 f_{rep} 信号可以直接通过光电探测器(PD)探测,因此其中 5% 端口的输出光直接接入光电探测器(PD1)实现图 1(d)中 f_{rep} 的锁定,95% 端口的输出光用于脉冲放大,以用于后续 f_{ceo} 的探测。输出脉冲在经过 OC2、ISO2 以及 WDM2 的尾纤后展宽至 ps 量级。一段长度为 1.2 m 的 EDF 作为光纤放大器,该 EDF 在 1530 nm 处吸收系数为 80 dB/m,在 1550 nm 处的群速度色散为 $+28 \text{ ps}^2/\text{km}$,因此在脉冲放大后仅通过具有反常色散的 SMF 即可实现简单的脉冲压缩。光纤放大器采用双向泵浦结构,两台 LD 的最大输出功率分别为 730 mW 和 737 mW。

图 1(c)为通过超连续谱产生共线型自参考 $f-2f$ 拍频探测光路来实现对 f_{ceo} 的探测。将脉冲光谱展宽至跨越一个倍频程,然后用倍频晶体将长波处的光谱倍频,与短波处光谱干涉来实现 f_{ceo} 信号的探测。因此,通过非线性脉冲放大得到具有高峰值功率脉冲后,将其泵浦至一段高非线性光纤(HNLF)以激发自相位调制、交叉相位调制、四波混频、受激拉曼散射等多种非线性效应,将原先的光谱拓宽至一个倍频程。本实验中使用的 HNLF 长度约为 27 cm,非线性系数约为 $10.7 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,在 1550 nm 处色散近零且具有近零色散斜率。由于 HNLF 模场直径约为 $4 \mu\text{m}$,与 SMF 的模场直径 $10.4 \mu\text{m}$ 不匹配,在熔接时需要优化熔接机的主放电时间、主放电功率等参数,最终熔接效率约为 85%。由 HNLF 得到倍频程光谱后,通过自主搭建的共线型 $f-2f$ 自参考拍频探测光路来探测 f_{ceo} 信号。基

频光和倍频光两个频率在 HNLF 中产生时因微小的光纤色散出现时间延迟,在 HNLF 后熔接一段 SMF 光纤来进行色散补偿使两频率分量实现时间上的同步。后接入光纤准直器(Col.)进入空间光路结构。由于倍频晶体产生二次谐波需要满足相位匹配关系,若要实现高效率的非线性频率转换则要求入射激光为确定的线偏振态,因此在倍频晶体前放置一个 $2 \mu\text{m}$ 波段的半波片,与压缩 SMF 光纤上的 PC3 共同作用以调控入射至倍频晶体的偏振态。所用倍频晶体为 $10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的周期性极化铌酸锂(PPLN)晶体。它具有 29.60, 30.20, 30.80, 31.40, 32.00, 32.60, 33.20 μm 共 7 个周期,每个极化周期宽 0.5 mm,极化周期之间由宽为 0.2 mm 的非极化材料区域隔开,可以实现 1968~2270 nm 泵浦光至 984~1135 nm 输出光二次谐波的产生,且在晶体的输入和输出端面均镀有 $1 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$ 的双层增透膜。通过短聚焦透镜(L1)将超连续光谱聚焦至 PPLN 晶体产生短波成分的倍频光,然后与超连续光谱中原有的短波成分外差拍频再通过聚焦透镜(L2)共同聚焦至光电探测器(PD2)中,实现 f_{ceo} 信号的探测。由于超连续谱中其他光谱分量强度较高,在 PD2 前用一个中心波长位于 1000 nm 处的带通滤光片(filter)来滤除 1000 nm 以外的其他光信号,以提高 f_{ceo} 信号的信噪比。

在实现 f_{rep} 和 f_{ceo} 信号的探测后,系统中分别搭建了如图 1(d)、(e)所示的锁相环电路,来实现对 f_{rep} 和 f_{ceo} 信号锁定。由 PD1 获取高信噪比的 f_{rep} 信号,经过带通滤波器(BPF1)滤除高次谐波后送入功率放大器(Amp1)进行信号放大。由 GPS 溯源信号发生器(signal generator)产生一个与 f_{rep} 信号接近的外部参考信号,与放大后的 f_{rep} 信号共同送入混频器(mixer1)得到误差信号后,接入低通滤波器(LPF1)滤除高频信号部分,然后将误差信号接入伺服控制器(PI servo1),最后经过高压(HV)放大后反馈到谐振腔的 PZT 上,用以调整 PZT 的伸缩量来实现腔长反馈的 f_{rep} 信号锁定。 f_{ceo} 信号的锁定电路与其类似,主要区别在于 f_{ceo} 信号在实际测量中线宽较宽,超过了伺服控制可达到的反馈控制带宽,因此在混频之前使用一个分频器(divider)对其进行 256 分频。分频后的信号与信号发生器提供的参考信号送入混频器(mixer2)进行鉴相,参考信号由同一 GPS 信号发生器溯源,经低通滤波后输入伺服控制器(PI servo2),最终反馈至振荡器的泵浦电流,以实现 f_{ceo} 信号锁定。

3 基于 45° -TFG 锁模光纤振荡器的输出特性

当 LD1 的泵浦功率达到 20 mW 时,激光器出现连续波信号,继续提高泵浦功率至 90 mW 以上,仔细调节腔内偏振,可以获得稳定的锁模脉冲。如图 3 所示,

记录了当泵浦功率为 228 mW 时, 输出展宽脉冲的相关特性。从图 3(a) 中对数光谱以及归一化的线性光谱可以看出, 脉冲的中心波长位于 1578.3 nm, 光谱 3 dB 带宽达到 60.4 nm, 光谱顶部轮廓较为平坦, 两侧边沿平滑下降, 符合典型的展宽脉冲输出光谱特征。振荡器通过输出耦合器直接接入自相关仪测得的脉冲自相关(AC)曲线如图 3(b) 插图所示, 利用高斯函数对自相关曲线进行拟合得到脉冲宽度为 271 fs, 经过优化腔外输出端 SMF 长度, 最终得到的最窄脉冲宽度为 68 fs, 如图 3(b) 所示, 由此计算得出脉冲相应的时带积(TBP)为 0.494, 与高斯线型的傅里叶转换极限 0.441 十分接近。另外, 压缩后的自相关

曲线两翼出现旁瓣, 这是由于光纤中存在的高阶色散和其他非线性效应无法用 SMF 压缩, 脉冲前后沿出现拖尾现象。图 3(c) 为示波器上显示的脉冲序列, 可知两个脉冲之间的间隔为 19.9 ns, 对应图 3(d) 射频(RF)频谱上的基本重复频率为 50.2 MHz, 与激光器的腔长相吻合。在频谱仪采样范围为 1 MHz、分辨率带宽(RBW)为 100 Hz 时, 没有明显的边带调制, 信噪比约为 68 dB, 插图频率范围为 3.6 GHz、RBW 为 10 kHz 时的脉冲频谱, 信号强度无明显波动且无任何亚结构, 表明输出脉冲为稳定的单脉冲锁模。此时输出脉冲平均功率约为 20.2 mW, 对应的单脉冲能量约为 0.4 nJ。

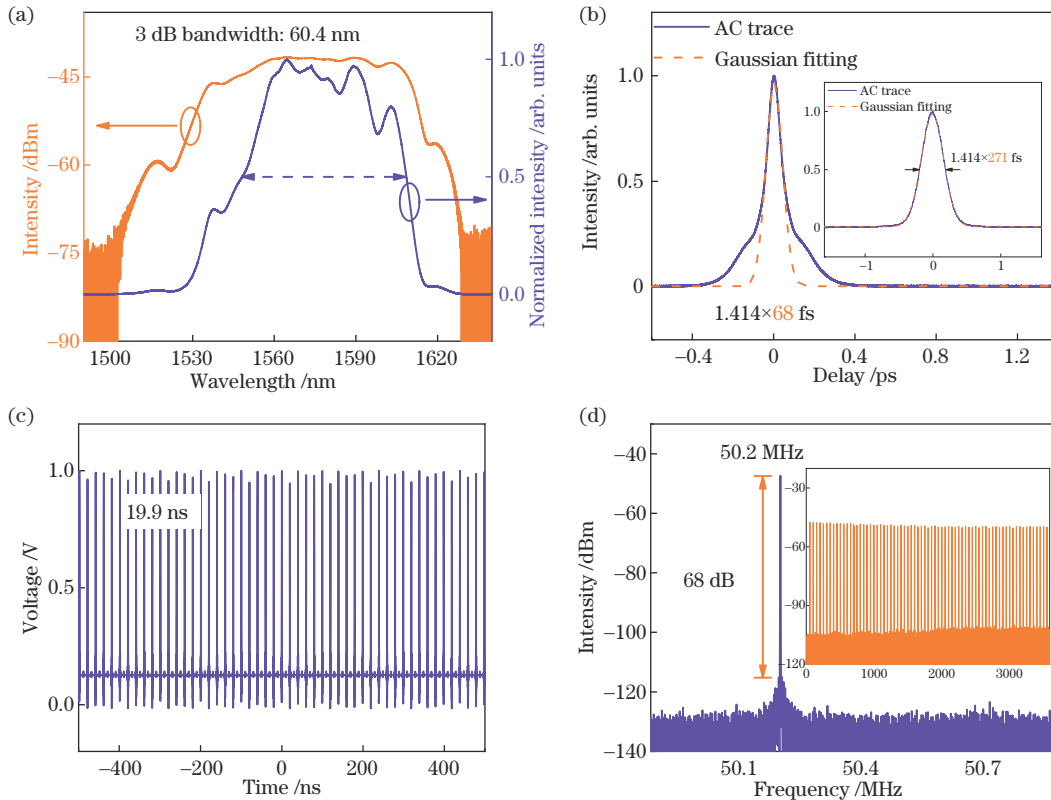


图 3 泵浦功率 228 mW 时的展宽脉冲锁模输出特性。(a) 输出光谱(橘色: 以 dBm 为纵坐标单位的对数光谱。紫色: 纵坐标单位归一化后的线性光谱); (b) 直接输出脉冲和压缩后(插图)脉冲的自相关曲线, 以及相应的高斯拟合曲线; (c) 输出脉冲序列; (d) 射频频谱

Fig. 3 Performances of a stretched-pulse mode-locked laser at 228 mW pump power. (a) Optical spectrum with logarithmic scale (violate) and normalized linear scale (orange); (b) AC traces of the compressed and direct output (inset) pulses, and corresponding Gaussian fits; (c) output pulse train; (d) RF spectra

在实现锁模后, 通过对腔内偏振态的仔细优化, 振荡器能在较大泵浦功率范围内维持稳定的单脉冲展宽脉冲锁模, 图 4(a) 为随着泵浦功率从 162.1 mW 增加至 254.5 mW, 振荡器输出光谱的变化, 说明此振荡器在较大的泵浦范围内均可单脉冲展宽脉冲锁模, 这有利于后续对其进行反馈控制。同时对振荡器平均输出功率和单脉冲能量随着泵浦功率的变化也进行了测量和计算, 如图 4(b) 所示, 经过线性拟合可得振荡器的转换效率约为 7.26%。为了验证该振荡器的长期运行能

力, 实验中通过光谱仪和光功率计分别对其进行了长达 12 h 的监测, 图 4(c) 为每隔 1 min 对振荡器输出光谱进行采集的结果, 可以看出, 12 h 内光谱几乎保持不变。图 4(d) 为每隔 1 s 对输出功率进行采集的结果, 功率在 20.302~20.259 mW 内波动, 引起波动的原因除了泵浦激光器之外, 还有实验室环境温度变化和扰动。计算得到 12 h 内该振荡器输出功率的均方根(RMS)稳定性约为 0.033%。在普通实验室环境中观察, 激光器锁模后, 可以保持连续的锁模状态超过 5 天。

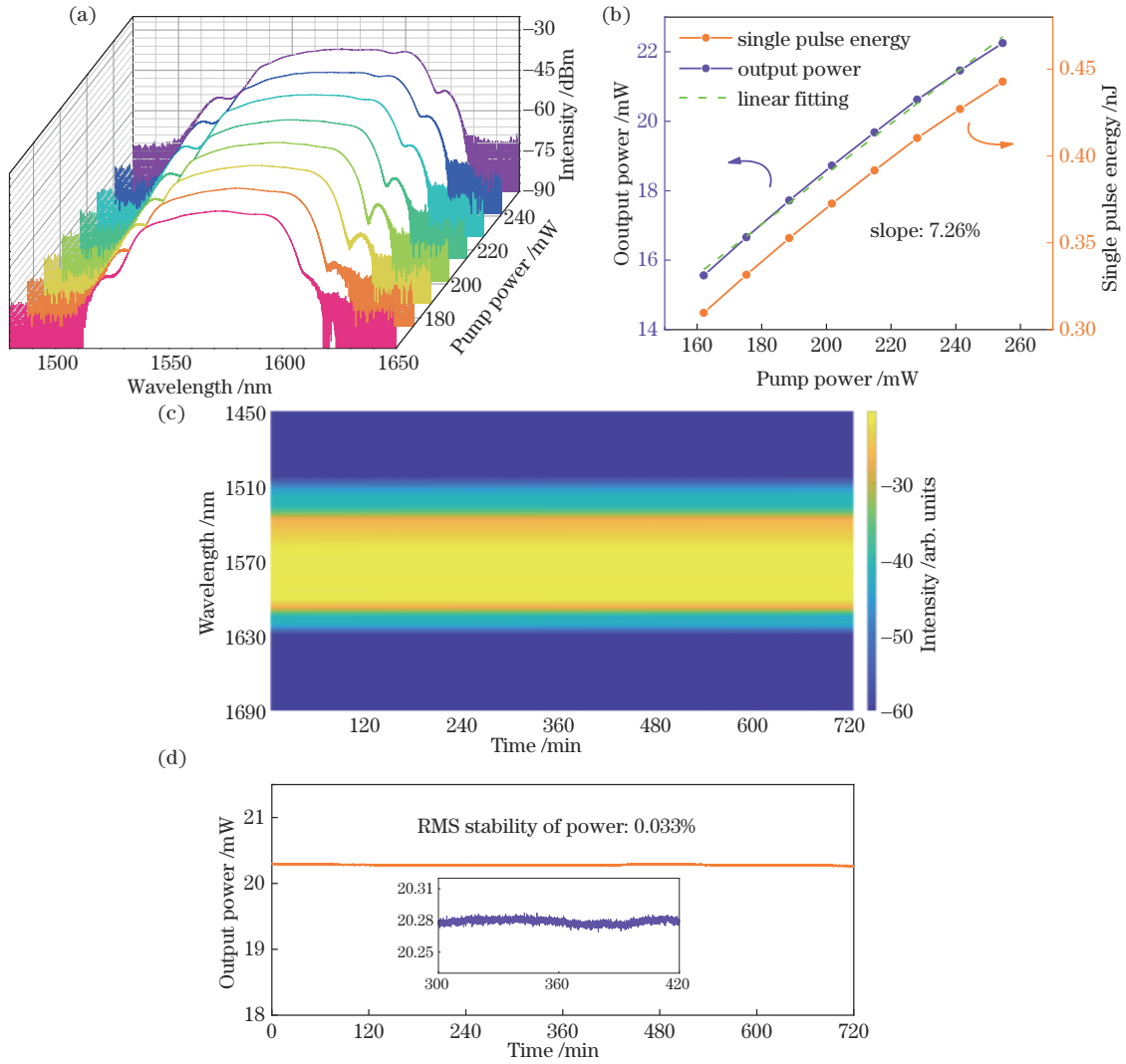


图 4 振荡器输出可靠性及稳定性测量。(a) 光谱随泵浦功率的变化; (b) 输出功率和单脉冲能量随泵浦功率的变化; (c) 12 h 内光谱演变; (d) 12 h 内输出功率演变

Fig. 4 Output reliability and stability measurements of the oscillator. (a) Evolution of optical spectrum with pump power; (b) variation of output power and single pulse energy with pump power; (c) evolution of optical spectrum within 12 h; (d) evolution of output power within 12 h

4 重复频率与载波包络偏移频率的锁定

以上对基于 45°-TFG 锁模光纤振荡器输出特性的测量表明, 无论从锁模脉冲输出特性, 还是锁模输出的稳定性以及锁模动态范围, 该振荡器已经可以作为后续构建光纤激光频率梳系统稳定可靠的种子源。

图 5(a) 是在光纤放大器前对脉冲自相关曲线的测量, 经过高斯曲线拟合后计算可得, 脉冲在进入放大前已经被展宽至 1.8 ps。光纤放大器后输出平均功率随泵浦功率增大的变化曲线如图 5(b) 所示, 可以看出, 其变化趋势呈现良好的线性关系, 转换效率约为 14%。在泵浦总功率最大 1467 mW 时, 可以得到最大输出功率为 201.4 mW。图 5(c) 为放大后脉冲的光谱, 与振荡器直接输出脉冲光谱相比, 由于光纤放大器

引入的非线性效应, 光谱被很大程度展宽。在泵浦总功率达到 1467 mW 时, 光谱 3 dB 带宽甚至超过了 100 nm, 同时由于强非线性效应, 光谱出现调制结构。通过逐步优化放大器后 SMF 长度来补偿由 EDF 引入的正常色散, 最终可以获得如图 5(d) 所示的脉冲自相关曲线, 通过高斯型曲线拟合可得, 压缩后脉冲宽度仅为 36 fs, 这比锁模光纤振荡器直接输出的傅里叶极限脉宽还要窄, 原因主要是光纤放大器非线性作用导致了光谱的进一步增宽。由于脉冲功率的放大, 在自相关曲线上可以明显看到主峰两侧由于非线性啁啾造成的底座。此时, 脉冲输出功率为 201.4 mW, 对于重复频率为 50.2 MHz 的激光器, 单脉冲能量达到了约 4.012 nJ。而底座在一定程度上影响了脉冲峰值功率的计算, 通过对整个自相关曲线和中心主峰部分进行积分计算可得, 主峰能量约占整个脉冲能量的 45%,

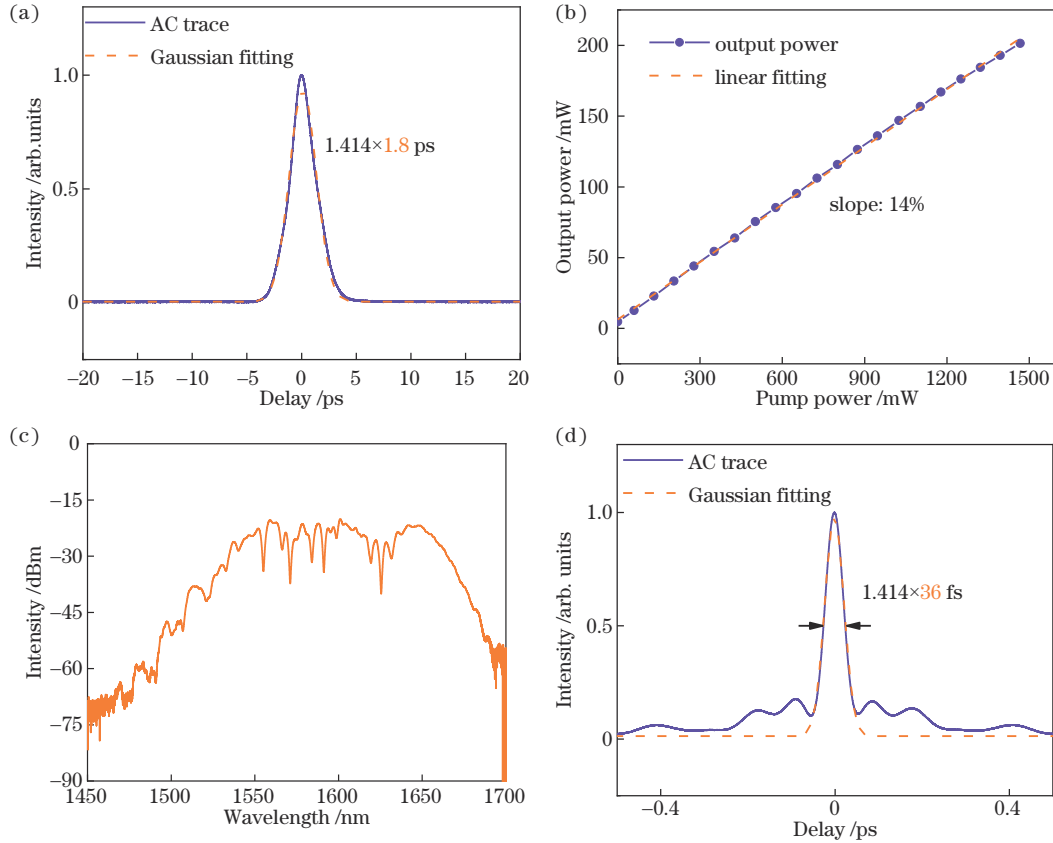


图5 脉冲放大特性。(a)放大器前的脉冲自相关曲线;(b)放大器输出功率随泵浦功率的变化;(c)压缩后脉冲光谱和(d)自相关曲线
Fig. 5 Characteristics of pulse amplification. (a) AC trace before amplifier; (b) variation of the output power of the amplifier with the pump power; (c) spectrum and (d) corresponding AC trace of the compressed pulse

此时实际脉冲峰值功率约为 47 kW。至此,脉冲能量及脉冲峰值功率完全满足倍频程超连续谱产生的条件。

将获得的高峰值功率脉冲输入至 HNLf, 分别使用近红外波段的光谱仪(AQ6370B, Yokogawa, 日本)和中红外波段的光谱仪(AQ6375, Yokogawa, 日本)测量在 HNLf 末端的光谱,如图 6(a)所示,可以看出,经过 HNLf 后输出光谱覆盖范围超过 $1\sim 2\ \mu\text{m}$, 满足后续光路干涉要求。经过 $f-2f$ 干涉光路后由 PD2 接收的信号频谱特性如图 6(b)所示,在 RBW 为 100 kHz 时,可以清晰分辨出信噪比约为 32 dB 的 f_{ceo} 信号。图 6(c)显示了 RBW 为 3 kHz 时 f_{ceo} 信号,采用洛伦兹型曲线拟合后,其 3 dB 带宽约为 40 kHz,表明此时锁模光纤激光器脉冲质量良好。这已经与许多商用光学频率梳的自由运转 f_{ceo} 信号线宽接近,表明此激光器的本身噪声较低,非常适合作为光学频率梳的种子源。

在实现 f_{rep} 信号锁定前,首先对 PZT 驱动电压对激光器重复频率 f_{rep} 的变化关系进行了实际测量。如图 7(a)所示,可以看出在 $0\sim 150\ \text{V}$ 的 PZT 驱动电压范围内,激光器的重复频率 f_{rep} 随着电压增加而降低,且呈现线性趋势,从约 50.198683 MHz 降到了约

50.198602 MHz,即 PZT 的伸缩可以改变的 f_{rep} 信号范围约为 81 Hz,能够满足长时间 f_{rep} 信号锁定的要求。为了评估 f_{rep} 信号锁定效果,利用频率计数器对锁定后 f_{rep} 的抖动进行记录,如图 7(b)所示,频率计数器的门时间为 1 s,可得锁定之后在 50 min 内 f_{rep} 信号波动的峰峰值为 880 μHz ,计算可得标准偏差为 114 μHz 。利用图 7(b)记录的频率数据计算 f_{rep} 信号锁定后归一化至重复频率的 Allan 偏差,结果如图 7(c)所示,可得 f_{rep} 信号锁定后在 1 s 门时间内频率稳定性为 2.38×10^{-12} ,100 s 门时间内下降到 2.09×10^{-13} 。Allan 偏差曲线基本符合 $\tau^{-1/2}$ 的变化规律,表明 f_{rep} 信号良好的锁定效果。

与重复频率 f_{rep} 锁定类似,实验中使用伺服锁相系统对载波包络偏移频率 f_{ceo} 信号进行频率稳定。通过实验测量 f_{ceo} 信号随振荡器泵浦电流的变化,如图 8(a)所示,可以看出泵浦电流从 366.9 mA 增加至 392.8 mA,即泵浦功率从 199.7 mW 提升至 216.7 mW 时, f_{ceo} 信号从约 20 MHz 漂移到了约 2.5 MHz。 f_{ceo} 信号与泵浦电流的压控灵敏度约为 0.68 MHz/mA。为防止 PI 控制器参数调节过程中超调使泵浦电流变化范围过大而造成激光器失去锁模状态,将伺服控制器的输出电压

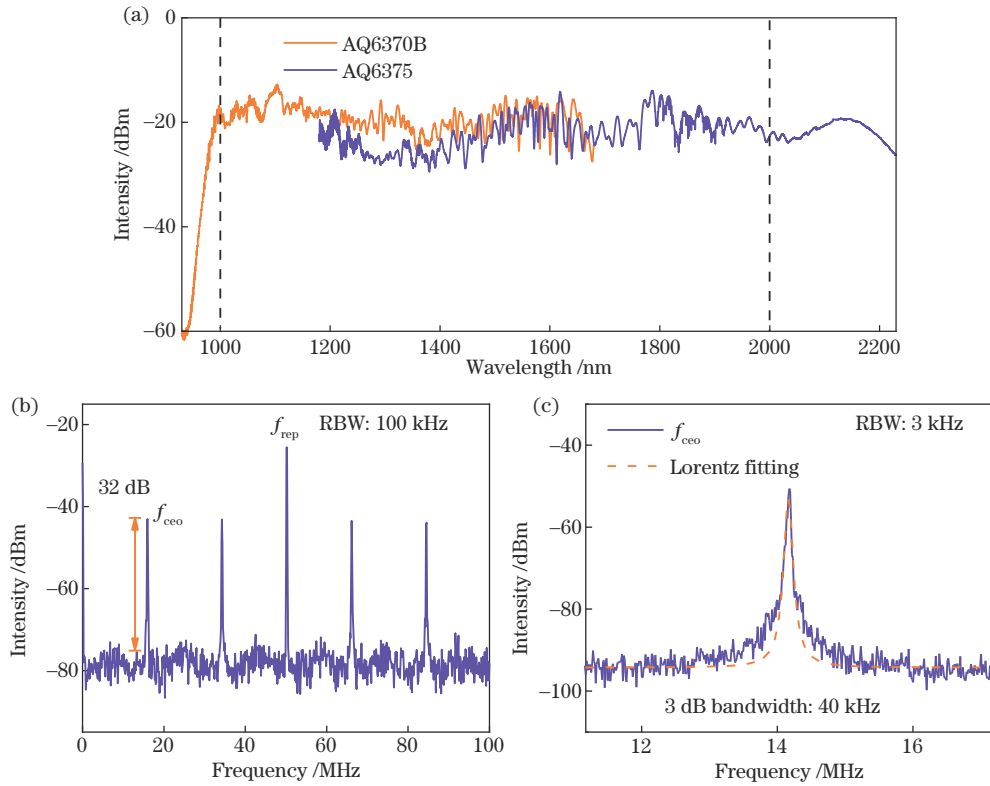


图 6 光谱。(a)经 HNLFF 后的倍频程超连续谱;RBW 分别为(b)100 kHz 和(c)3 kHz 时探测的 f_{ceo} 信号射频频谱
Fig. 6 Spectra. (a) Full octave-spanning supercontinuum spectrum at the output of the HNLFF; RF spectra of the f_{ceo} signal with RBW of (b) 100 kHz and (c) 3 kHz

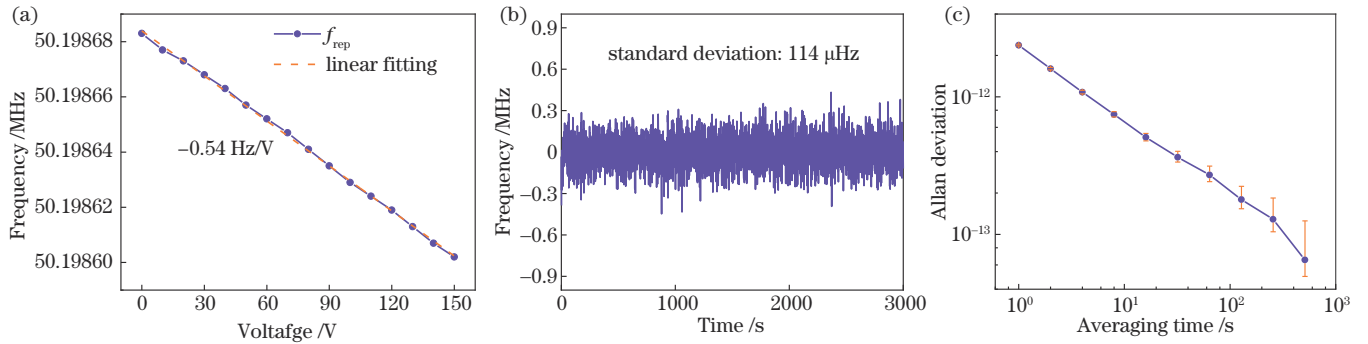


图 7 f_{rep} 信号的锁定。(a) f_{rep} 信号随 PZT 控制电压的变化;(b) f_{rep} 信号锁定后的频率抖动;(c) f_{rep} 信号锁定后的 Allan 偏差曲线 (归一化至 f_{rep} 信号)
Fig. 7 Stabilization of f_{rep} signal. (a) f_{rep} signal variation with PZT control voltage; (b) frequency fluctuation after f_{rep} signal stabilization; (c) Allan deviation curve after f_{rep} signal stabilization (normalized to f_{rep} signal)

范围调到 ± 200 mV,再通过优化 PI 控制器比例增益系数、PI 转角频率和偏置电压,实现 f_{ceo} 信号锁定。图 8(b)为锁定后经过 256 分频后的 f_{ceo} 信号的频谱特性, RBW 为 30 Hz,可以看到,锁定频率两边约 9 kHz 处出现两个对称的相干峰,表明此时锁定带宽约为 9 kHz。为评估 f_{ceo} 信号锁定效果,在实现锁定后,利用频率计数器对 256 分频后的 f_{ceo} 信号抖动进行记录,如图 8(c)所示,锁定后在 50 min 内分频后 f_{ceo} 信号的标准偏差为 440 μ Hz。利用图 8(c)记录的频率数据计算 f_{ceo}

信号锁定后归一化至光频 192 THz 的 Allan 偏差,结果如图 8(d)所示,可得 f_{ceo} 信号锁定后在 1 s 门时间内,其频率稳定性为 6.41×10^{-16} , 100 s 的门时间内频率稳定性下降到约为 4.07×10^{-17} 。此外在实现频率锁定后,对激光器强度噪声特性的测试结果如图 9 所示,可以看出,强度噪声在 100 Hz 到近 10 kHz 内有明显下降,这与 f_{ceo} 信号锁定带宽相对应,说明伺服锁相系统在降低了 f_{ceo} 噪声的同时,也良好地抑制了系统中的强度噪声。

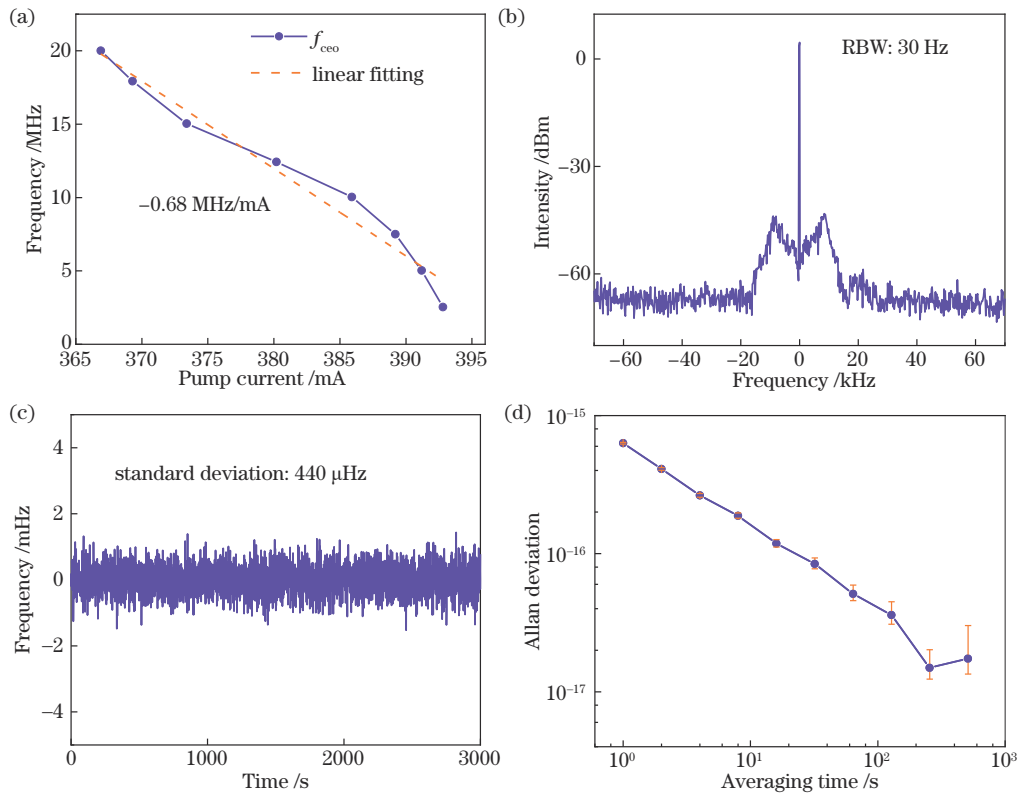


图 8 f_{ceo} 信号的锁定。(a) f_{ceo} 信号随振荡器泵浦电流的变化; (b) f_{ceo} 信号锁定经 256 分频后频谱; (c) f_{ceo} 信号锁定后的经 256 分频后的频率抖动; (d) f_{ceo} 信号锁定后的 Allan 偏差曲线(归一化至光频 192 THz)

Fig. 8 Stabilization of f_{ceo} signal. (a) f_{ceo} signal variation with pump current of oscillator; (b) RF spectrum of $f_{ceo}/256$ after stabilization; (c) frequency fluctuation after $f_{ceo}/256$ signal stabilization; (d) Allan deviation curve after f_{ceo} signal stabilization (normalized to 192 THz)

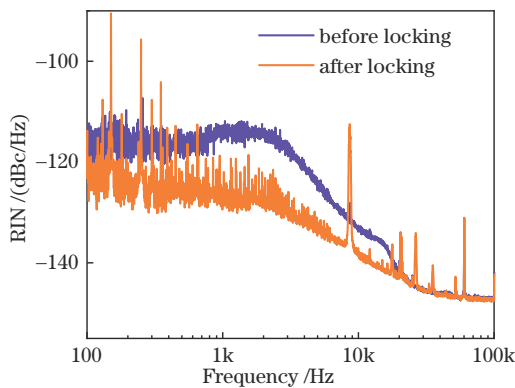


图 9 信号锁定前后基于 45°-TFG 锁模光纤激光器的强度噪声分布

Fig. 9 Intensity noise distribution of 45°-TFG-based mode-locked fiber laser before and after stabilization

5 结 论

本文采用 45°-TFG 作为 NPR 锁模技术中的光纤型起偏器, 自主搭建了一台基于 45°-TFG 的光纤激光频率梳系统。通过优化基于 45°-TFG 的锁模光纤激光振荡器, 获得了 3 dB 带宽为 60.4 nm、脉冲宽度约为 68 fs 的超短脉冲输出, 且具有良好的锁模可靠性及稳定性。经过脉冲放大以及高非线性光纤扩谱, 获得了

超过倍频程的超连续谱, 并搭建了 $f-2f$ 自参考拍频干涉光路探测到 32 dB 信噪比的 f_{ceo} 信号。该系统通过反馈控制 PZT 伸缩量和振荡器泵浦电流实现了对 f_{rep} 和 f_{ceo} 信号的精确锁定, 锁定后 f_{rep} 和 f_{ceo} 信号的归一化 Allan 偏差在 1 s 门时间下分别达到了 2.38×10^{-12} 和 6.41×10^{-16} 。未来可通过对振荡器进行精密温控封装, 光纤放大器及超连续产生单元全保偏化, 加入 EOM 反馈, 以及锁定至光频参考等手段进一步提升基于 45°-TFG 光纤激光频率梳的性能。

参 考 文 献

- [1] Picqué N, Hänsch T W. Frequency comb spectroscopy [J]. Nature Photonics, 2019, 13(3): 146-157.
- [2] Fortier T, Baumann E. 20 years of developments in optical frequency comb technology and applications[J]. Communications Physics, 2019, 2: 153.
- [3] Droste S, Ycas G, Washburn B R, et al. Optical frequency comb generation based on erbium fiber lasers [J]. Nanophotonics, 2016, 5(2): 196-213.
- [4] Kim J, Song Y J. Ultralow-noise mode-locked fiber lasers and frequency combs: principles, status, and applications[J]. Advances in Optics and Photonics, 2016, 8(3): 465-540.
- [5] 卢振旭, 李培丽, 王浩然. 基于光学频率梳的可选频毫

- 米波生成多业务分层 WDM-ROF 系统[J]. 中国激光, 2023, 50(10): 1006002.
- Lu Z X, Li P L, Wang H R. Multi-service layered WDM-ROF system with optional frequency millimeter wave based on optical frequency comb[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(10): 1006002.
- [6] 刘桐君, 叶慧琪, 唐靓, 等. 天文光谱高精度波长定标技术研究进展(特邀)[J]. 光子学报, 2023, 52(5): 0552203.
- Liu T J, Ye H Q, Tang L, et al. Research advance in astronomical high-precision wavelength calibration technology (invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(5): 0552203.
- [7] Tamura K, Haus H A, Ippen E P. Self-starting additive pulse mode-locked erbium fibre ring laser[J]. Electronics Letters, 1992, 28(24): 2226-2228.
- [8] Li X, Zou W W, Yang G, et al. Direct generation of 148 nm and 44.6 fs pulses in an erbium-doped fiber laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(1): 93-96.
- [9] Zhou L, Liu Y, Xie G H, et al. Generation of stretched pulses from an all-polarization-maintaining Er-doped mode-locked fiber laser using nonlinear polarization evolution[J]. Applied Physics Express, 2019, 12(5): 052017.
- [10] 夏传青, 武腾飞, 赵春播, 等. 光纤飞秒光学频率梳载波包络偏移频率锁定的实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 123201.
- Xia C Q, Wu T F, Zhao C B, et al. Experiment study on carrier-envelope offset frequency locking in a femtosecond fiber comb[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 123201.
- [11] Westbrook P S, Strasser T A, Erdogan T. In-line polarimeter using blazed fiber gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(10): 1352-1354.
- [12] Zhou K M, Simpson G, Chen X F, et al. High extinction ratio in-fiber polarizers based on 45° tilted fiber Bragg gratings[J]. Optics Letters, 2005, 30(11): 1285-1287.
- [13] Mou C B, Wang H, Bale B G, et al. All-fiber passively mode-locked femtosecond laser using a 45°-tilted fiber grating polarization element[J]. Optics Express, 2010, 18(18): 18906-18911.
- [14] Zhang Z X, Yan Z J, Zhou K M, et al. All-fiber 250 MHz fundamental repetition rate pulsed laser with tilted fiber grating polarizer[J]. Laser Physics Letters, 2015, 12(4): 045102.
- [15] Liu X L, Wang H S, Wang Y S, et al. Single-polarization, dual-wavelength mode-locked Yb-doped fiber laser by a 45°-tilted fiber grating[J]. Laser Physics Letters, 2015, 12(6): 065102.
- [16] 林彦吕, 黄梓楠, 黄千千, 等. 基于 Lyot 滤波器的脉冲态可切换掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(19): 1901004.
- Lin Y L, Huang Z N, Huang Q Q, et al. Pulse state switchable ytterbium-doped fiber laser based on Lyot filter [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1901004.
- [17] Li J F, Wang Y Z, Luo H Y, et al. Kelly sideband suppression and wavelength tuning of a conventional soliton in a Tm-doped hybrid mode-locked fiber laser with an all-fiber Lyot filter[J]. Photonics Research, 2019, 7(2): 103-109.
- [18] Zou M, Ran Y L, Hu J, et al. Multiwavelength mode-locked fiber laser based on an all fiber Lyot filter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(22): 1419-1422.
- [19] Song Q G, Ye B L, Xiao X P, et al. Theoretical and experimental analysis of second order Bragg resonance of 45° TFG and its fiber laser application[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(1): 012201.
- [20] Bharathan G, Hudson D D, Woodward R I, et al. In-fiber polarizer based on a 45-degree tilted fluoride fiber Bragg grating for mid-infrared fiber laser technology[J]. OSA Continuum, 2018, 1(1): 56.
- [21] Huang Q Q, Zou C H, Mou C B, et al. 23 MHz widely wavelength-tunable L-band dissipative soliton from an all-fiber Er-doped laser[J]. Optics Express, 2019, 27(14): 20028-20036.
- [22] Li W X, Huang Z N, Xiao X P, et al. 0.017 nm, 143 ps passively mode-locked fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. Optics Letters, 2023, 48(10): 2676-2679.
- [23] Wang T X, Yan Z J, Huang Q Q, et al. Mode-locked erbium-doped fiber lasers using 45° tilted fiber grating[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 1101506.