

基于掺铒光纤激光器的光频梳研究

贾 婧, 黄俊涛, 徐 昕

合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥

Email: jjajing@mail.hfut.edu.cn

收稿日期: 2021年3月12日; 录用日期: 2021年6月21日; 发布日期: 2021年6月29日

摘 要

光纤激光器是二十世纪科学技术的一项重大成就,它具有低损耗、低功耗、结构简单、集成度高等优点。文章主要对基于掺铒光纤激光器的光频梳系统进行设计,搭建了全光纤结构的飞秒激光器,并且完成了光功率放大和重复频率锁定的实验研究。在实验中搭建的飞秒激光器的输出功率为0.63 mW,重复频率为90 MHz,光谱宽度为12.49 nm,通过放大器放大后光功率达到45 mW,光谱宽度展宽到42 nm,最后通过PID控制器,将激光器的重复频率锁定到稳定的参考信号源上,在0~1000 s记录时间内,记录数据的标准差为156 μ Hz。通过以上实验,文章不仅实现了对飞秒脉冲的光放大,还完成了对飞秒激光器重复频率的锁定,搭建出了一台可用于精密测量等领域的实用型飞秒光频梳。

关键词

锁模激光器, 光功率放大, 频率锁定, 飞秒激光, 光频梳

Research on Optical Frequency Comb Based on Erbium-Doped Fiber Laser

Jing Jia, Juntao Huang, Xin Xu

Hefei University of Technology, College of Instrument Science and photoelectric engineering, Hefei Anhui

Email: jjajing@mail.hfut.edu.cn

Received: Mar. 12th, 2021; accepted: Jun. 21st, 2021; published: Jun. 29th, 2021

Abstract

Fiber laser is a major achievement of science and technology in the twentieth century. It has the advantages of low loss, low power consumption, simple structure and high integration. This

文章引用: 贾婧, 黄俊涛, 徐昕. 基于掺铒光纤激光器的光频梳研究[J]. 光电子, 2021, 11(2): 69-77.

DOI: [10.12677/oe.2021.112009](https://doi.org/10.12677/oe.2021.112009)

article mainly designs an optical frequency comb system based on erbium-doped fiber laser, builds a femtosecond laser with all-fiber structure, and completes experimental research on optical power amplification and repetitive frequency locking. The output power of the femtosecond laser built in the experiment is 0.63 mW, the repetition frequency is 90 MHz, the spectral width is 12.49 nm, the optical power is amplified by the amplifier to 45 mW, and the spectral width is expanded to 42 nm. Finally, the PID controller is used to lock the repetition frequency of the laser to a stable reference signal source. The standard deviation of the recorded data is 156 μ Hz during the recording time from 0 to 1000 s. Through the above experiments, this paper not only realized the optical amplification of the femtosecond pulse, but also completed the lock of the repetition frequency of the femtosecond laser, and built a practical femtosecond optical frequency comb that can be used in precision measurement and other fields.

Keywords

Mode-Locked Laser, Optical Power Amplification, Frequency Lock, Femtosecond Laser, Optical Frequency Comb

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 光通信、光纤传感、相干激光雷达、激光测距和太赫兹技术等领域所取得的进步都离不开激光器的产生和发展。到 20 世纪末, 飞秒光频梳的产生为这些领域的进一步发展提供了新的技术方案。在时间域上, 飞秒光频梳输出的是一系列周期性的飞秒脉冲, 将这些周期性的脉冲转化到频率域上, 得到的是等间距的梳状光谱, 即光学频率梳。飞秒光频梳因为其独特的时域和频域特性, 在精密测量、光频计量、空间科学、激光光谱学等领域得到了广泛的应用。

近些年, 国内外对光纤光频梳展开了深入的研究。从 2007 年到 2010 年, 美国标准实验室的叶军小组与 IMRA 公司合作, 将光纤光频梳产生技术与啁啾脉冲放大技术相结合, 可得到光学频率梳的平均输出功率为 80 W, 同时可获得 120 fs 的脉冲输出[1], 又在此实验的基础上利用外腔增强技术获得最短波长为 38 nm 的极紫外光梳[2], 这一实验结果推动了光频梳在紫外领域的科学发展研究。

Pupeza 等[3][4]利用非线性脉冲压缩技术, 获得了输出功率为 43 W、脉冲宽度为 51 fs 的掺镱光纤光频梳, 并以此为驱动源, 使用外腔增强技术获得最短输出波长 11.45 nm 的极紫外光频梳。

Zhao 等[5]研究了一种利用可饱和吸收体滤波器和腔损耗控制器的窄线宽单纵模掺铒激光器, 应用腔损耗控制器实现了均衡的双波长输出, 光纤激光器的光信噪比高于 68 dB, 在 250 mW 泵浦功率下, 双波长输出功率达到 0 dBm, 且具有小于 2.5 kHz 的窄线宽。

Zhang 等[6]研究了一种低噪声窄线宽单频光纤激光器, 分别借助掺铒光纤放大器, 未泵浦的 980 nm 泵浦源以及 Sagnac 反馈腔, 有效地抑制了噪声和窄线宽, 实现了 1.5 μ m 波长的单频输出, 输出功率为 11.1 W, 消光比接近于 60 dB, 而频谱线宽远低于 1.8 kHz。

本文搭建了全光纤结构的锁模激光器, 产生重复频率为 90 MHz 的锁模飞秒脉冲, 随后对飞秒脉冲进行放大, 实现了对激光器重复频率的精确锁定, 并对基于掺铒光纤激光器的光学频率梳特性进行了研

究。

2. 光纤飞秒激光器

掺铒光纤激光器由泵浦源、波分复用器(Wavelength Division Multiplexing, WDM)、掺铒增益光纤、压电陶瓷、耦合输出器以及半导体可饱和吸收镜(Semiconductor Saturable Absorption Mirror, SESAM)组成[7]。泵浦源为掺铒增益光纤中上下能级粒子发生反转提供能量；波分复用器是将泵浦光耦合进光纤激光器中，其优点是低插入损耗和拥有较高的隔离度，有效防止泵浦光反射回泵浦源，对泵浦源造成损坏；掺铒增益光纤是为了减少激光在传输过程中的传输损耗；压电陶瓷通过改变激光器的腔长大小，从而实现光频梳重复频率的锁定和调节；耦合器的作用是将一部分光直接输出，另一部分光在谐振腔内被循环放大[8]。

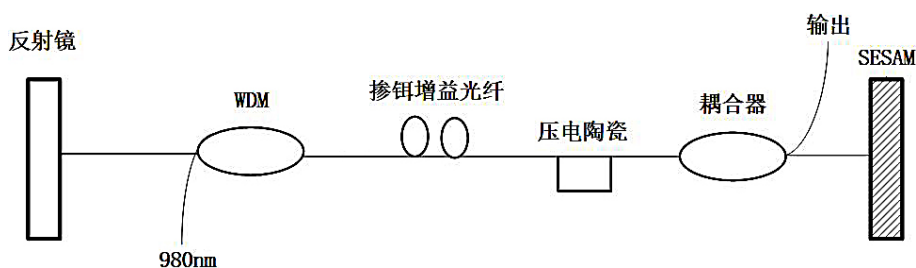


Figure 1. Device diagram of erbium doped fiber femtosecond laser (WDM: wavelength division multiplexing system, SESAM: semiconductor saturable absorber)

图 1. 掺铒光纤飞秒激光器装置图(WDM: 波分复用系统, SESAM: 半导体可饱和吸镜)

图 1 是掺铒光纤激光器的一般结构示意图。泵浦源产生的 980 nm 泵浦激光通过 WDM 输入到激光器掺铒增益光纤中，产生 1550 nm 波长的激光。激光器由 SESAM 实现锁模，产生周期性的飞秒脉冲[9] [10]。通过电压控制压电陶瓷的长度，从而改变激光器的腔长，来实现激光器重复频率的锁定和调节。激光器产生的飞秒激光通过耦合器输出，耦合器的输出比为 95:5，即 5% 的光直接输出，剩余的激光在谐振腔内循环。

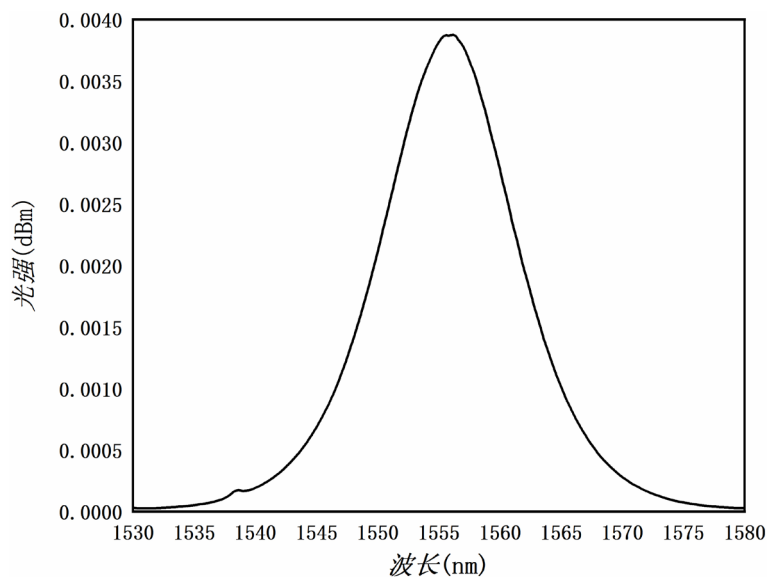


Figure 2. Mode locking spectrum of femtosecond laser

图 2. 飞秒激光器锁模光谱

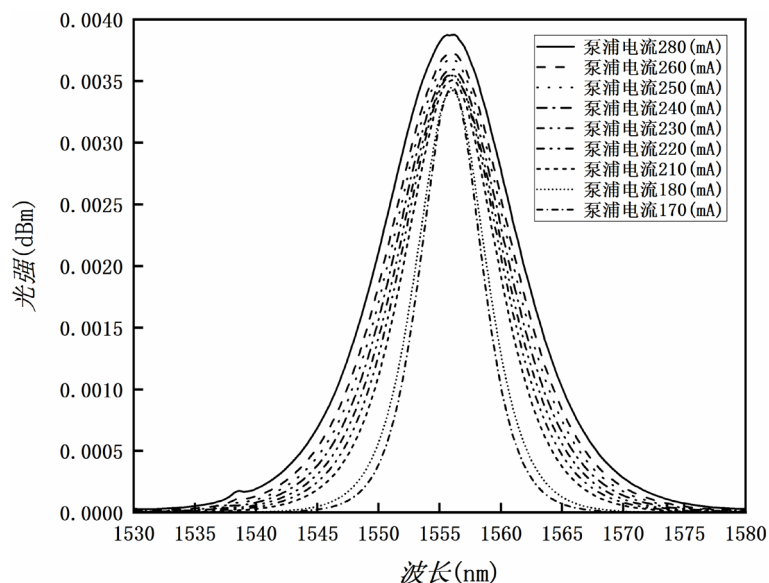


Figure 3. Curve of light intensity changing with the wavelength of input light wave

图 3. 光强随输入光波波长变化曲线

按照图 1 搭建掺铒光纤飞秒激光器, 进行飞秒激光器锁模的实验研究。将泵浦电流从 0 开始缓慢增加, 当泵浦电流增加到 280 mA 时, 激光器实现锁模, 此时飞秒激光器的输出光谱如图 2 所示, 此时光谱的中心波长为 1556 nm, 光谱宽度为 12.49 nm, 通过光功率计测量的光功率为 0.63 mW。

实验中不断减小激光器的泵浦电流, 得到不同泵浦电流对应的输出光谱如图 3 所示。由图 3 可知, 随着泵浦电流的不断减小, 光谱宽度在不断减小, 当泵浦电流为最小的 170 mA 时, 光谱宽度仅为 5.86 nm。但在这一过程中, 激光器光谱的中心波长始终保持不变, 光谱基本以光波波长 1556 nm 为中心对称分布。当泵浦电流进一步减小, 激光器的锁模光谱消失, 激光器不再处于锁模状态。因此激光器锁模的泵浦电流范围大约为 170~280 mA。

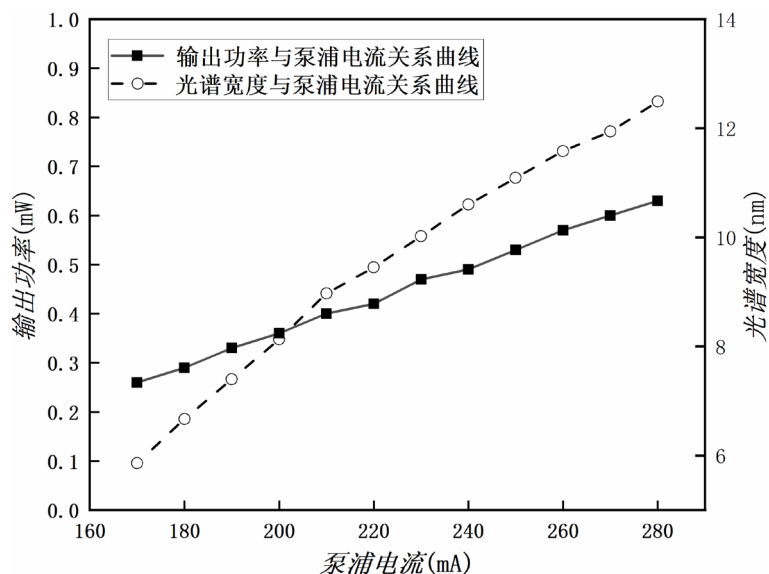


Figure 4. Spectrum width and pump current versus output power

图 4. 光谱宽度和泵浦电流与输出功率关系曲线

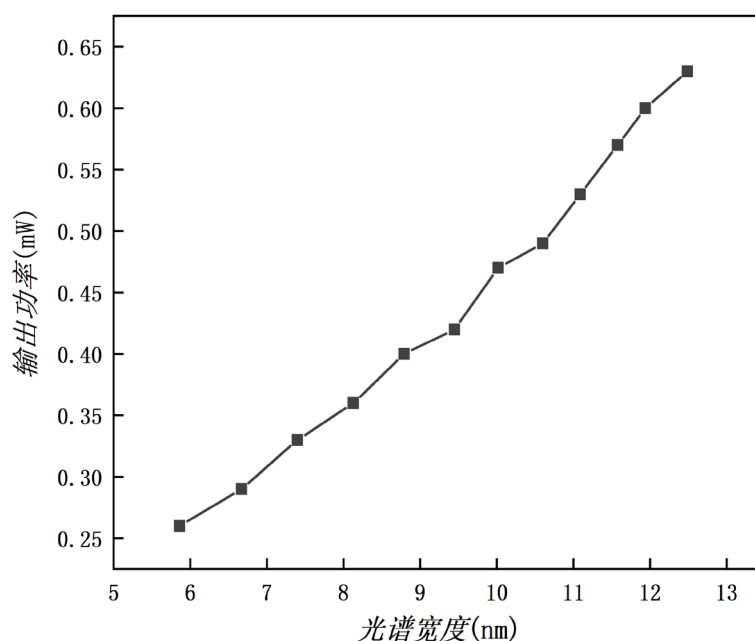


Figure 5. Relation curve between output power and spectral width
图 5. 输出功率与光谱宽度关系曲线

根据实验数据,绘制出光谱宽度和激光器输出功率随泵浦电流的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知,当泵浦电流从 170 mA 增大到 280 mA 时,相应的输出功率从 0.26 mW 增大到 0.63 mW,光谱宽度从 5.86 nm 展宽到 12.49 nm,激光器输出功率随着泵浦电流的增大而增大,同样地,光谱宽度随着泵浦电流的增大而展宽。从图中可以看出,输出功率和光谱宽度随泵浦电流的变化曲线基本呈线性规律,进一步验证了输出功率和光谱宽度随泵浦电流变化的实验结果。

根据实验数据,绘制出光谱宽度和泵浦电流与输出功率变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知,当光谱宽度从 5.86 nm 展宽到 12.49 nm 时,相应的输出功率从 0.26 mW 增加到 0.63 mW,光谱宽度与输出功率曲线近似为成正比关系。

3. 飞秒脉冲的放大

当飞秒激光器腔内功率过大时,会对 SESAM 晶体造成损坏,并且这种损坏是不可修复的。因此,飞秒激光器工作时,应尽量让其在功率较小的状态下工作[11]。本实验选择飞秒激光器的锁模电流为 280 mA,但此时飞秒激光器的输出光功率仅为 0.63 mW,无法满足其在实际中应用,因此,需要对飞秒激光器产生的脉冲功率进行放大。

本文对光信号的放大主要是指在光纤锁模激光器腔内的增益放大,掺铒光纤放大器主要是利用掺铒光纤的受激放大原理,光放大过程是将掺铒光纤激光器输出的光信号和泵浦源发出的 980 nm 的泵浦光耦合到波分复用器中,再通过掺铒增益光纤输出放大后的光信号。

实验中采用的是前向放大结构,搭建的光放大器结构如图 6 所示,在泵浦激光和掺铒增益光纤的共同作用下,使飞秒激光器产生的周期性飞秒脉冲功率得到放大。

实验记录了不同泵浦电流对应的输出光谱,结果如图 7 所示。可以看出放大后的光谱以中心波长为对称轴,两侧的光强变化趋势呈近似对称分布,中心波长始终保持在 1556 nm 左右,光谱宽度随着泵浦电流的增加不断展宽,与未进行脉冲放大前的光谱(图 3)相比,光谱宽度得到了明显的展宽。

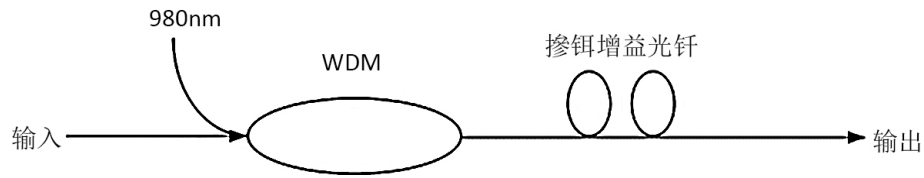


Figure 6. Experimental setup of femtosecond pulse amplification
图 6. 飞秒脉冲放大实验装置图

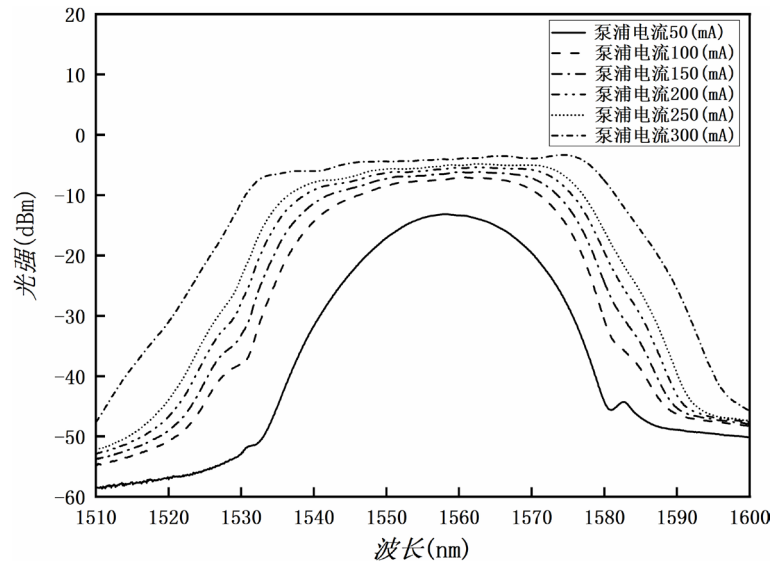


Figure 7. Relationship curve of light intensity and wavelength under different pump current
图 7. 不同泵浦电流下光强与波长关系曲线

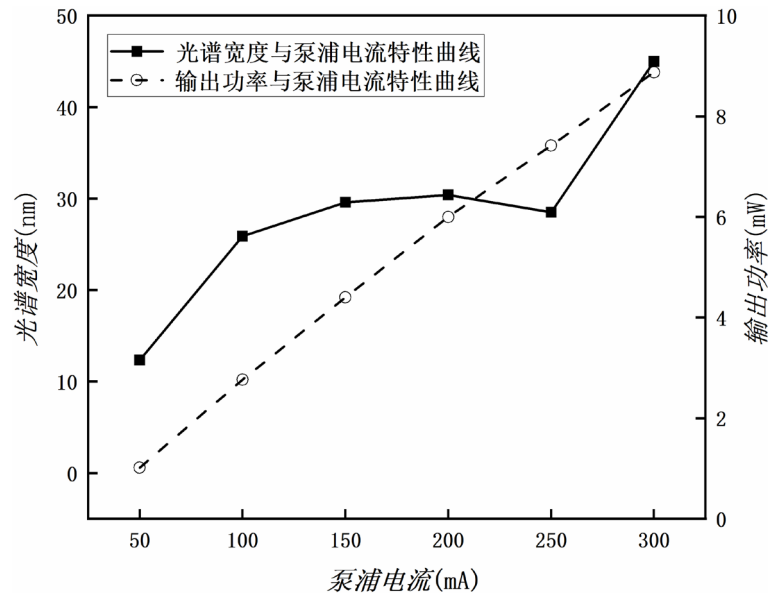


Figure 8. Output power and spectral width versus pump current
图 8. 输出功率和光谱宽度与泵浦电流关系曲线

图 8 曲线是光功率进行放大后的光功率和光谱宽度与泵浦电流特性曲线图。由图 8 可知，当泵浦

电流从 50 mA 增大到 300 mA 时, 相应的输出功率从 0.59 mW 增大到 45 mW, 光谱宽度从 12.35 nm 展宽到 42 nm, 输出功率和光谱宽度与泵浦电流基本满足线性变化关系。当泵浦电流为 300 mA 时, 输出功率大约为 45 mW, 此时的光谱宽度可以达到 42 nm, 放大效果显著, 可满足光频梳在实际测量中的使用。

4. 飞秒脉冲的重复频率锁定

飞秒激光器输出的周期性飞秒脉冲, 对应到频域上是一系列等间距的梳状光谱, 且相邻两根梳齿之间的频率间隔等于激光器输出脉冲的重复频率 f_r 。在一般工作条件下, 由于受到实验室温度、环境变化, 实验平台震动等因素的影响, 重复频率 f_r 会发生变化, 进而导致飞秒激光器输出的梳状光谱发生变化。因此, 想要获得稳定的梳状光谱, 需要将梳齿间的频率间隔 f_r 锁定到稳定的参考源上[12]。

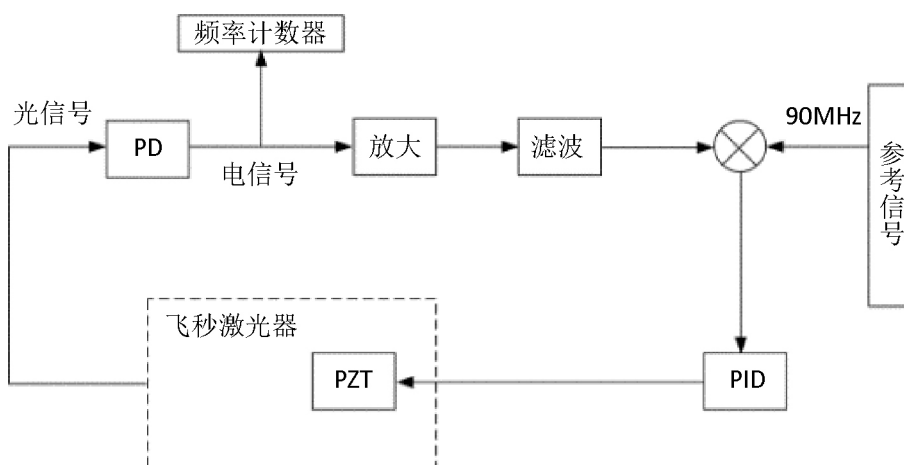


Figure 9. Femtosecond pulse repetition rate locking experimental system
图 9. 飞秒脉冲重复频率锁定实验系统

实验中采用的飞秒脉冲重复频率锁定系统的整体结构如图 9 所示, 主要包括光学部分和控制部分[13]。光学部分包括激光器谐振腔长度的调节和锁定; 控制部分指的是硬件控制电路, 主要包括信号处理电路、PID 控制器、参考信号源。

飞秒脉冲重复频率锁定实验系统基本工作原理如下。在飞秒激光器内部, 通过压电陶瓷(Piezoelectric Transducer, PZT)控制光纤长度的伸缩, 来实现对飞秒激光器腔长的控制。激光器输出的光脉冲由光电探测器(PD)转换为电信号, 但是由于 PD 直接产生的电信号功率较小, 信噪比较小, 因此实验通过设计微波电路对电信号进行放大和滤波。经过放大滤波后的电信号和由标准信号源产生的参考信号经过混频器拍频, 得到两个信号重复频率之间的差值 Δf , 再将 Δf 作为误差信号输入到 PID 控制器中, 由 PID 控制器驱动 PZT 装置, 通过 PZT 的微小位移改变腔长, 实现对重复频率的控制, 使滤波后的电信号能够动态跟踪上基准信号, 亦可认为锁定至基准信号, 这样就可以使重复频率 f_r 的稳定精度和输入参考信号的稳定精度相同。

在 PID 控制器没有工作、PZT 没有进行补偿的情况下, 使用频率计数器对激光器重复频率进行采样, 采样间隔为 1 s, 结果如图 10 所示。受到环境因素的影响, 重复频率 f_r 在 90,260,580 Hz~90,260,750 Hz 内不断地无规则变化, 波动范围达到 170 Hz, 记录数据的标准差为 $\sigma_a = 35.84$ Hz。

经过重复频率锁定之后得到重复频率采样数据如图 11 所示, 当采用信号处理及控制系统之后, 重复频率 f_r 稳定度明显提升, 波动范围已经在毫赫兹水平, 记录时间为 1000 秒, 数据标准差为 $\sigma_b = 156$ μ Hz。

在图 11 中某些部分重复频率波动相对较大, 是因为飞秒光纤激光器没有进行封装, 光纤完全裸露在实验环境中, 受震动、空气对流等因素影响所导致的。

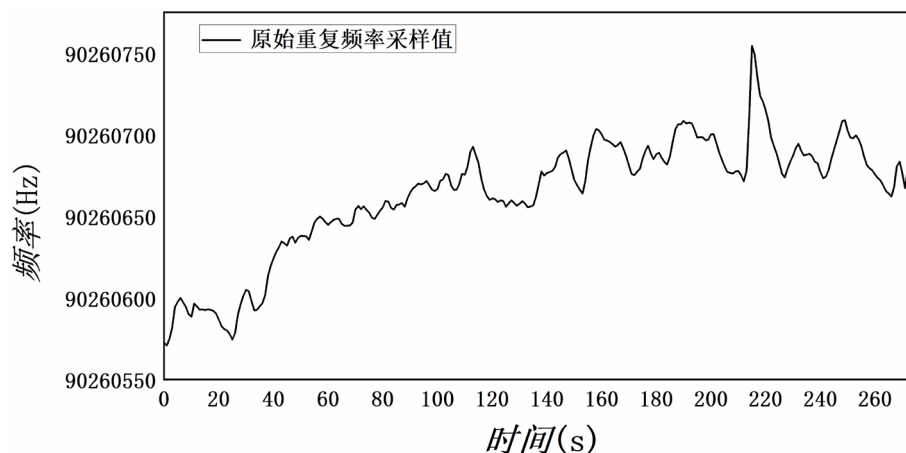


Figure 10. Sample data of original repetition rate

图 10. 原始重复频率采样数据

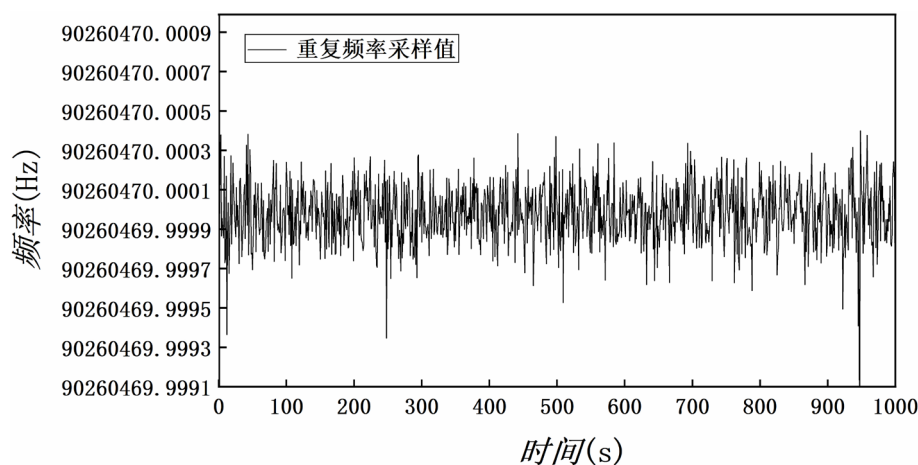


Figure 11. Sampling data of repetition rate after locking

图 11. 锁定后重复频率采样数据

5. 结论

本文搭建了基于掺铒飞秒激光器的光学频率梳系统, 采用 SESAM 锁模的方式, 实现了重复频率 90 MHz、中心波长 1556 nm、光谱宽度 12.49 nm、功率 0.63 mW 的飞秒脉冲输出。通过测试不同泵浦电流下激光器输出的光谱和功率, 发现随着泵浦功率的减小, 锁模光谱的宽度逐渐变小, 输出功率也随之下降。由于飞秒激光输出功率较小, 为满足实际使用, 搭建了飞秒脉冲放大器, 对其输出功率进行了放大, 放大后的光功率可以达到 45 mW, 光谱宽度为 42 nm。此外, 通过 PID 控制器对激光器腔内的 PZT 进行精确的调节和控制, 实现对飞秒激光器重复频率的锁定, 使重复频率具有与参考信号源相同的稳定精度, 对锁定后的重复频率进行记录, 在 1000 s 内, 数据标准差达到 156 μ HZ。

基金项目

合肥工业大学大学生创新创业训练项目(201910359052)。

参考文献

- [1] Ruehl, A., Marcinkevicius, A., Ferman, M.E., *et al.* (2010) 80W, 120fs Yb-Fiber Frequency Comb. *Optics Letters*, **35**, 3015-3017. <https://doi.org/10.1364/OL.35.003015>
- [2] Arman, C., Dylan, C.Y., Thomas, K.A., *et al.* (2012) Direct Frequency Comb Spectroscopy in the Extreme Ultraviolet. *Nature*, **482**, 68-71. <https://doi.org/10.1038/nature10711>
- [3] Pupeza, I., Holzberger, S., Eidam, T., *et al.* (2013) Compact High-Repetition-Rate Source of Coherent 100 eV Radiation. *Nature Photonics*, **7**, 608-612. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.156>
- [4] Pupza, I., Högner, M., Weitenberg, J., *et al.* (2014) Cavity-Enhanced High-Harmonic Generation with Spatially Tailored Driving Fields. *Physics Review Letters*, **112**, Article ID: 103902. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.103902>
- [5] Zhao, J., Zhang, C., Miao, C., *et al.* (2014) Switchabl Narrow Linewidth Single-Longitudinal Mode Erbium Fiber Laser by Using Saturable-Absorber Filter and Cavity Loss Control. *Optics Communications*, **331**, 229-234. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.06.022>
- [6] Zhang, Q., Hou, Y., Qi, S., *et al.* (2017) Low-Noise Single-Frequency 1.5 μ m Fiber Laser with a Complex Optical-Feedback Loop. *IEEE Photonics Technology Letters*, **29**, 193-196. <https://doi.org/10.1109/LPT.2016.2632747>
- [7] 闫露露. 掺铒光纤飞秒光梳的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 陕西师范大学, 2014.
- [8] 陈相材, 高伟清, 陈亮, 徐强, 倪陈全, 陈丽. 线形和复合腔结构布里渊光纤激光器实验研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2019, 42(5): 716-719.
- [9] 郑亚如. 基于高掺杂铒光纤的单频窄线宽激光器研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2018.
- [10] 刘雪丽. 1550 nm 窄线宽全光纤脉冲激光器的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [11] 高凡. 光传输系统中掺铒光纤放大器的研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 广西师范大学, 2019.
- [12] 赵春播, 武腾飞, 梁志国. 飞秒激光器脉冲重复频率的锁定技术研究[J]. 新技术新仪器, 2014, 34(6): 22-25.
- [13] 商建明. 光纤锁模激光器及其在光纤频率传递中的应用研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2019.