

SESAM锁模全保偏光纤激光器重复频率的精确锁定

罗浆¹, 杨松¹, 郝强¹, 曾和平^{1,2}

¹ 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

² 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

摘要 实验采用共振增强式非线性折射率调制技术实现了半导体可饱和吸收镜锁模全保偏掺镱光纤激光器重复频率的精确锁定。在掺镱光纤激光器的腔内加入一个980/1064 nm的波分复用器(WDM)和一段掺铒增益光纤,通过反馈控制加载在该掺铒光纤上的976 nm抽运光LD2功率调控掺铒光纤的非线性折射率,进而对激光器的光学腔长实施控制,最终实现重复频率的精确锁定。优化了不同掺铒光纤长度及抽运光初始功率对激光器重复频率控制范围和锁定精度的影响。结果表明:当掺铒光纤长度为1.75 m时,通过调整抽运光功率能够实现180 Hz的重复频率调整范围;而重复频率的锁定精度仅与抽运光的初始功率密切相关,并不受掺铒光纤长度的明显影响。当LD2抽运光强度为18 mW时,重复频率峰-峰值的波动范围小于0.5 mHz,相应的标准偏差为0.16 mHz,输出功率的标准偏差为0.009 mW。此外,通过反馈控制抽运源LD1的强度,并取掉了腔内的掺铒增益光纤及与其相连的WDM,发现由于共振增强非线性和克尔非线性对光纤折射率的叠加,在稳定的单脉冲锁模区间内,重复频率单调变化的范围增加至1 kHz,而锁定精度略有降低。

关键词 光纤光学; 光纤激光器; 锁模; 重复频率锁定; 非线性折射率

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0206003

Precise Locking the Repetition Rate of a SESAM Mode-Locking All Polarization Maintaining Fiber Laser

Luo Jiang¹, Yang Song¹, Hao Qiang¹, Zeng Heping^{1,2}

¹ School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

² State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract High precision locking of the repetition rate of a semiconductor saturable absorber mirror mode-locked all polarization maintaining fiber laser is achieved by using the method of resonance-enhanced nonlinearity in an additional active fiber. A 980/1064 nm wavelength division multiplexer (WDM) and a piece of Er-fiber are added in the fiber cavity to induce the change of nonlinear refractive index and optical cavity length. By feedback controlling the pump power of LD2, the refractive index of the Er-fiber is modulated, and thus the optical length of the laser can be controlled to achieve the high precision locking of the repetition rate. The length of the Er-fiber and the initial pump power of LD2 are optimized to maximize the range and precision for repetition rate locking. Results show that as much as 180 Hz controlling range is obtained in the condition of 1.75 m length of Er-fiber. The repetition rate of locking accuracy is just closely related to the initial pump power and is not significantly affected by the length of Er-fiber. The range of repetition rate peak-to-peak is less than 0.5 mHz, the corresponding standard deviation is 0.16 mHz, and the standard deviation of output power is 0.009 mW in the condition of 18 mW pump power of LD2. Moreover, the pump power of LD1 is controlled by the feedback, when removing Er-fiber and the WDM. Due to the

收稿日期: 2016-09-01; 收到修改稿日期: 2016-10-08

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ150092)、国家自然科学基金(11404211)、上海市自然科学基金(13ZR1458100)

作者简介: 罗浆(1991—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: jiang_luo@foxmail.com

导师简介: 郝强(1981—),男,博士,副教授,主要从事超快激光技术方面的研究。

E-mail: qianghao@usst.edu.cn(通信联系人)

superposition of the resonance-enhanced nonlinearity and the Kerr nonlinearity on the refractive index of Yb-fiber, the repetition rate increases to 1 kHz with a slightly decrease of locking accuracy in a stable single pulse mode locking range.

Key words fiber optics; fiber laser; mode-locking; repetition rate locking; nonlinear refractive index

OCIS codes 060.3510; 140.4050; 060.2630; 190.4370

1 引 言

超短脉冲光纤激光器在许多领域有着广泛的应用,如精密光谱学^[1]、光频测量^[2]、超低噪声微波产生^[3]等,并可应用于激光雷达等国防军事领域。尤其是光学频率梳^[4]的飞速发展,使得重复频率锁定的光纤激光器在高精度距离测量^[5]、天文观测^[6]和星载光钟等领域中,日益扮演着更加重要的角色。

目前,锁定激光器重复频率的方法主要是采用压电陶瓷(PZT)控制激光谐振腔的几何长度 L ,也可采用控制激光腔内传输介质的折射率的方法,如压电挤压改变光纤折射率 n ,实现对激光器光学腔长 $s = L \times n$ 的控制。2007 年,韩海年等^[7]将钛宝石激光器谐振腔的一个光学镜片固定于 PZT 上,通过 PZT 的电致伸缩控制激光谐振腔的几何腔长,对重复频率的锁定采用了提取其 89 次谐波的锁定方法,最终获得了 10 min 内峰-峰值 0.01 mHz 的波动范围。2014 年,赵春播等^[8]利用同样的方法实现了光纤激光器重复频率的精确控制,锁定后重复频率的峰-峰值波动范围约为 5 mHz,1 s 采样时间的艾伦方差值为 5.0×10^{-12} 。2015 年,Feng 等^[9]采用双 PZT(共振频率分别为 138 kHz 和 37 kHz)对保偏掺铒光纤激光器的重复频率进行锁定,锁定后重复频率的标准偏差为 0.092 mHz。然而,利用 PZT 控制激光器重复频率的方案也存在一些缺点,比如需要较高的操作电压、环境扰动比较敏感、长期稳定性不佳、较难实现激光器的全光纤化等。2015 年,Shen 等^[10]在全光纤激光器谐振腔内加入一个光纤耦合的电控偏振控制器(EPC),通过调制施加在 EPC 上的电压,在实现锁模自启动的同时也可以控制激光器的重复频率。该激光器重复频率的可控范围为 62 Hz,锁定后的标准偏差为 1.4 mHz。然而,空间结构的固体激光器、半空间半光纤结构的光纤激光器或者是基于偏振旋转锁模的全光纤激光器都易受振动及环境温度变化的影响,仅能实现短期的稳定工作。

2013 年,一种全光方案被成功用于偏振旋转锁模光纤激光器的重复频率锁定实验^[11]。该全光方案采用的是抽运调制改变有源光纤折射率技术,也可称为共振增强非线性技术。即在掺铒激光谐振腔内加入一个 980/1550 nm 波分复用器和一段掺镱光纤,并在不影响锁模状态的前提下,通过调制加载至该掺镱光纤上的抽运光强度来改变该段光纤中的反转粒子数,进而控制该光纤的非线性折射率,实现对整个激光器光学腔长的控制。在参考文献[11]中,报道的锁定后重复频率的标准偏差为 22 mHz。2015 年,Yang 等^[12]在此方案的基础上,通过控制掺铒光纤折射率锁定了掺镱光纤激光器的重复频率,锁定后重复频率的标准偏差为 1.39 mHz 量级。为了进一步提高激光器重复频率的锁定精度,2016 年,Hao 等^[13]采用该方法实现了“8”字腔结构掺铒光纤激光器的重复频率锁定。为了实现 1.55 μm 锁模激光的自启动,该激光器采用了一段用于色散补偿的非保偏光纤。由于该激光器均采用了保偏光纤(除色散补偿光纤外)和保偏光纤耦合器件,大大降低了环境扰动对激光器重复频率锁定的影响,最终实现了 5 min 内峰-峰值波动小于 0.4 mHz,4 h 内峰-峰值波动小于 1 mHz,相应的标准偏差仅为 0.077 mHz。

考虑到自启动全保偏光纤结构超短脉冲激光器在实际环境中的应用需求,特别是在对激光器长期稳定性十分敏感的星间/星地通信、星载光钟等领域,本文采用全光方法实现了半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模的全保偏掺铒光纤激光器重复频率的精确锁定。当掺铒光纤长度为 1.75 m 时,通过调整抽运光功率能够实现 180 Hz 的重复频率调整范围,锁定精度高达 0.16 mHz。

2 实验装置和方法

实验装置如图 1 所示。实验搭建了驻波腔结构的全保偏光纤激光器。其中,锁模启动元件 SESAM 被贴在光纤端面上,作为该驻波腔的一个反射端镜。由中心波长 1064 nm、反射率 99%、带宽 0.2 nm 的光纤布拉格光栅(FBG)作为该驻波腔的另一个反射端镜。该锁模激光器由最大输出功率为 200 mW、中心波长为 976 nm 的半导体激光器 LD1 提供抽运光,通过 980/1064 nm 波分复用器 WDM1 将抽运光耦合进驻波腔

内。该驻波腔的增益介质为 0.5 m 长的高浓度掺镱光纤，在 976 nm 波长处的吸收系数约 250 dB/m，其纤芯直径为 6.5 μm ，数值孔径为 0.11。

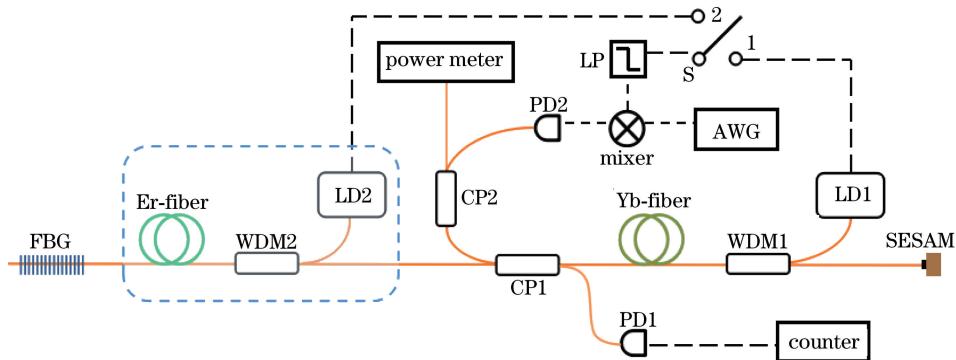


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

全光方法的重复频率锁定单元由最高功率为 200 mW、中心波长为 976 nm 的半导体激光器 LD2、980/1064 nm 波分复用器 WDM2 以及一段掺铒光纤组成。该掺铒光纤纤芯直径为 7 μm ，数值孔径为 0.15。重复频率锁定单元熔接于 FBG 和 CP1 之间，剩余的抽运光以及掺铒光纤产生的自发辐射可以从 FBG 端泄出腔，能尽量减少对激光器锁模的影响。

光电二极管 PD1 和 PD2 用来测量激光器的重复频率信号。其中，PD2 测到的重复频率信号和信号发生器(AWG)的参考信号(重复频率信号的十次谐波)共同输入混频器，得到用于反馈控制的误差信号。该误差信号经过低通滤波器(LP)处理后，可获得最终加载到光纤激光器抽运源上的调制信号。由于采用重复频率的高次谐波可获得更为显著的误差信号，故而重复频率锁定精度更高。实验采用开环测量方式，光电二极管 PD1 独立测量激光器的重复频率，由频率计数器记录重复频率的长时间变化。

3 实验数据和分析

当激光器内加入 WDM2 及掺铒光纤后，激光器的重复频率约为 12.66 MHz。图 2(a)和(b)分别为激光器输出光谱和脉冲自相关曲线。测量到的光谱半峰全宽为 0.07 nm，高斯拟合后的脉冲宽度为 24 ps，时间带宽积为 0.44，说明该激光器输出为变换极限脉冲。相比于非线性偏振旋转(NPR)锁模激光器，该激光器锁模稳定，抗干扰能力强，即使甩动激光器腔内光纤也不会丢失锁模，能够实现长达数月的稳定输出。

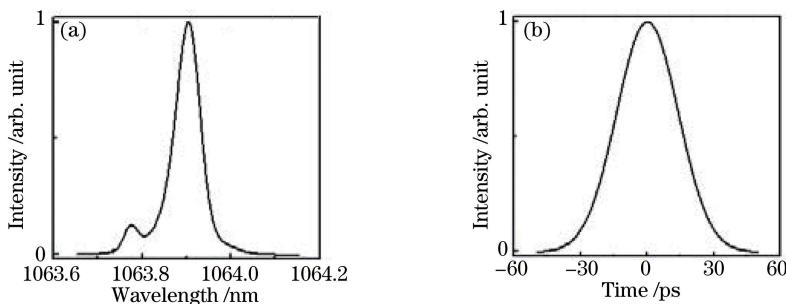


图 2 激光器的 (a) 输出光谱和 (b) 脉宽

Fig. 2 (a) Output spectrum and (b) pulse width of laser

实验中为了测量重复频率及输出功率随 LD2 的变化关系，激光器被放置于一个恒温箱内。恒温箱的温控精度为 0.1 °C，工作温度设定在 30 °C。当恒温箱的设定温度变化 1 °C 时，测量到的激光器重复频率变化约为 80 Hz。图 3(a)设定 LD2 抽运功率为 0 mW 时，激光器重复频率漂移为 0 Hz。考虑到掺铒光纤会吸收腔内振荡的部分 1064 nm 激光，随着 976 nm 抽运光功率密度的增加，掺铒光纤中原本由 1064 nm 光子激发的 Er^{3+} 会被 976 nm 抽运光激发，导致 1064 nm 的功率出现了上升趋势。随着 LD2 抽运功率继续增加，光

纤中的 Er^{3+} 皆被 976 nm 抽运光激发至饱和状态, 不再吸收 1064 nm 光子, 因此, 1064 nm 激光的输出功率呈现饱和的趋势。当 LD1 的抽运功率为 66 mW, 而 LD2 的抽运功率从 0 mW 增加至 120 mW 时, 激光器重复频率变化量为 240 Hz。由此说明, 该激光器的重复频率锁定能力可抵抗 3 °C 的环境温度变化。此外, 发现调制深度 ($|\Delta f_{\text{rep}}/\Delta p|$, Δp 为抽运光的变化量) 从 0 mW 时的 3.8 Hz/mW 下降至 120 mW 时的 0.56 Hz/mW, 而相应的频率控制精度从 7.6 mHz 提高到 1.1 mHz。

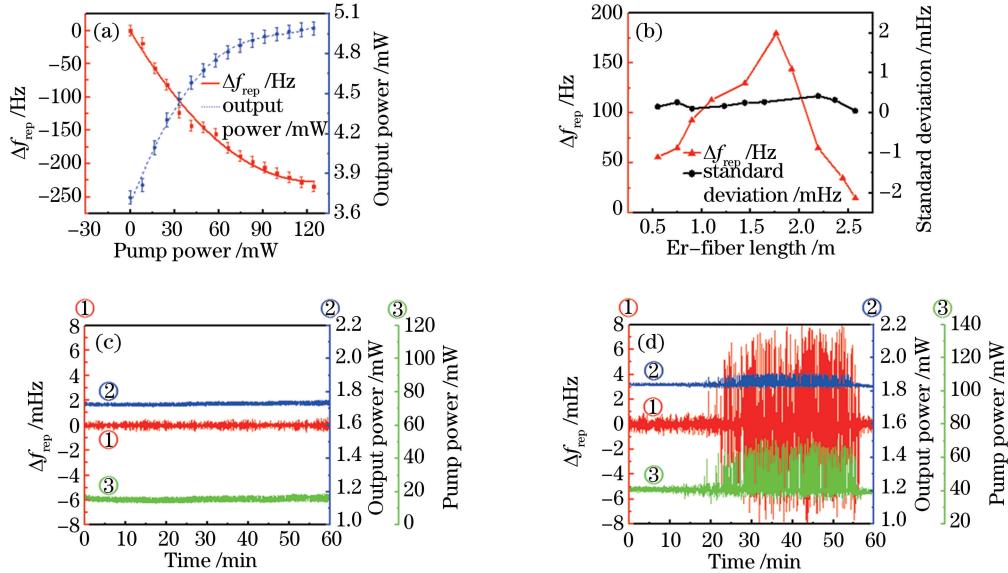


图 3 激光器重复频率(红色)和输出功率(蓝色)随(a)LD2 抽运功率和(b)掺铒光纤长度的变化曲线; LD2 初始值为(c)18 mW 和(d)40 mW 时激光器重复频率(红色), 输出功率(蓝色)和抽运功率(绿色)的波动曲线

Fig. 3 Repetition rate (red) and the corresponding output power (blue) versus (a) pump power of LD2 and (b) Er-fiber length; (c) fluctuations of repetition rate (red), output power (blue) and pump power (green) with initial pump power of (c) 18 mW and (d) 40mW from LD2

较大范围的重复频率控制能力能够抵御激光器外部环境的扰动, 有利于实现激光器重复频率的长期锁定。实验过程中, 考虑到抽运光的吸收强度沿掺铒光纤长度分布不均匀, 进一步测量了不同长度掺铒光纤对重复频率控制范围及锁定精度的影响。测量过程中, 将 LD1 的抽运功率设定为 80 mW(略高于锁模阈值), 并通过截断法测量掺铒光纤的最优长度。结果如图 3(b)所示, 当掺铒光纤长度短于或者长于该最优值时, 重复频率的可控范围均明显减少。对掺铒光纤最优值的存在可作如下分析: 当掺铒光纤长度较短 ($L < 1.0 \text{ m}$) 时, 相对较强的抽运光可使掺铒光纤中绝大部分的 Er^{3+} 处于激发态, 且尚有部分抽运光未被吸收。随着掺铒光纤长度的增加至 1.75 m, 抽运光趋近于被完全吸收, 掺铒光纤中处于激发态 Er^{3+} 的数目趋近最大值, 其折射率的变化量趋近最大值。因此, 光学腔长 s 的变化量随着掺铒光纤长度 L 的增加而增加, 重复频率可控范围增大。当掺铒光纤长度较长 ($L > 1.75 \text{ m}$) 时, 在相对较强的抽运条件下, 易产生 1530~1570 nm 波段附近的放大自发辐射(ASE)。反向传输的 ASE 极大地消耗了掺铒光纤前端(抽运入射端)处于激发态的 Er^{3+} , 显著弱化了抽运致折射率变化的效果, 从而使得重复频率的变化量减少。

此外, 掺镱锁模激光器腔内功率大小也会直接影响重复频率的可控范围。当 LD1 抽运功率处于锁模阈值、LD2 输出的 976 nm 抽运光为零时, 掺铒光纤会吸收部分 1064 nm 波长的光子, 实现一定数量的粒子数反转。逐步增加 LD2 的抽运功率, 吸收 976 nm 光子的反转粒子数逐渐增加, 而吸收 1064 nm 的反转粒子数逐渐减少。当 LD1 抽运功率较高时, 掺镱锁模激光器的腔内功率处于较高水平, 这种 976 nm 光子与 1064 nm 光子竞争反转粒子数的过程显得较为困难, 即表现为重复频率可控范围减少。此外, 各熔接点的损耗、掺铒光纤的长度及器件插损均会通过腔内功率这个参量反映至重复频率的可控范围上。因此, 最佳掺铒光纤长度的测量结果受到 LD1、LD2、各熔接点的损耗、掺铒光纤的长度及器件插损等参数的共同影响。尽管重复频率的可控范围随掺铒光纤长度变化十分明显, 但是全光方法的控制精度均无明显变化, 保持在

500 μHz 以下,如图3(b)中的黑色曲线所示。

为了比较LD2的不同静态工作点对激光器重复频率锁定精度的影响,设定了18 mW和40 mW两个初始抽运功率,并分别记录了1 h范围内激光器的重复频率(红色)、输出功率(蓝色)和LD1抽运功率(绿色)的变化情况,如图3(c)和(d)所示。当LD2的初始抽运功率为18 mW时,重复频率峰-峰值的波动范围小于0.5 mHz,相应的标准偏差为0.16 mHz,功率波动的标准偏差为0.009 mW。当LD2的初始抽运功率增加至40 mW时,重复频率峰-峰值的波动范围增加至8 mHz,相应的标准偏差增加至2 mHz,功率波动的标准偏差增大为0.016 mW。对于激光器输出功率而言,明显可以看出静态工作点在18 mW时的锁定精度优于静态工作点在40 mW的锁定精度。

此外,采用同样的方式还实验了反馈控制LD1锁定重复频率的效果,并从图1的实验装置中移除掺铒光纤地重复频率控制单元。因此,振荡器仅包括FBG,CP1,掺镱光纤,WDM1和SESAM,激光器重复频率相应的增加至22.65 MHz,平均输出功率为3.6 mW。当开关S转向1时,LD1不仅为激光器的锁模提供了抽运能量,而且为激光器重复频率的稳定提供了抽运调制。LD1抽运功率在66~124 mW之间变化时,激光器处于基频锁模状态。

掺镱光纤折射率受到共振增强非线性及克尔非线性的共同影响。随着LD1抽运功率的增加,共振增强非线性折射率增量与克尔非线性折射率增量叠加,激光器产生显著的重复频率变化。图4(a)为激光器重复频率和输出功率随LD1抽运功率的变化曲线。将LD1抽运功率在66 mW的重复频率设置为0 Hz。当LD1抽运功率从锁模临界功率66 mW增加至多脉冲锁模(MP-ML)产生的功率124 mW时,重复频率变化范围为1 kHz。当LD1抽运功率增加至80 mW时,重复频率基本为线性减少,调制深度从66 mW时的45 Hz/mW下降到124 mW的1.5 Hz/mW,主要原因在于增益介质里粒子数逐渐达到饱和导致了调制深度的下降。考虑到抽运功率的分辨率为2 μW ,重复频率的控制精度从90 mHz提升至3 mHz,但是其控制能力减弱为原来的3.33%。

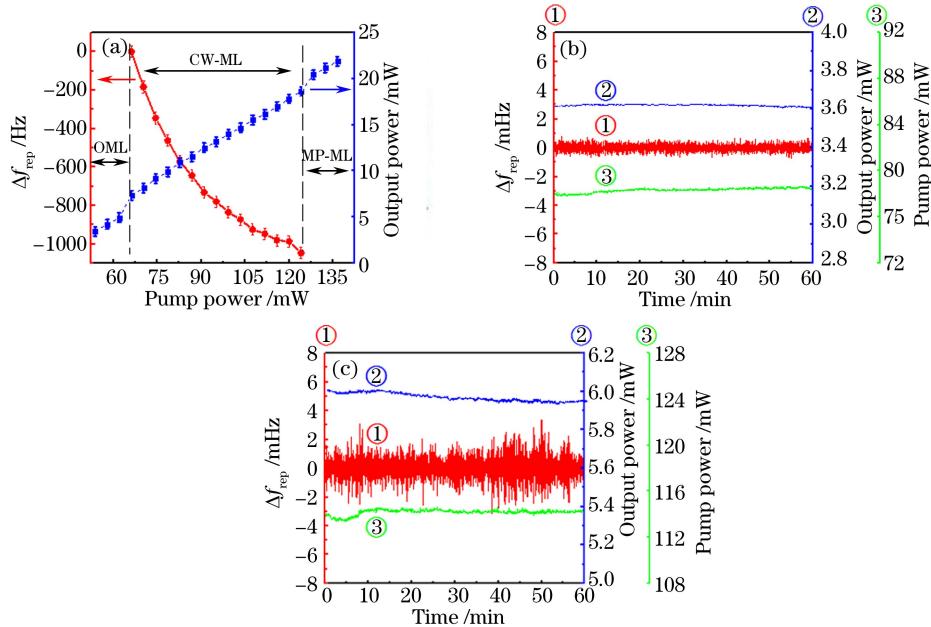


图4 (a) 激光器重复频率(红色)和输出功率(蓝色)随LD1抽运功率的变化曲线; LD1初始值为(b) 78 mW 和 (c) 114 mW时,激光器重复频率(红色),输出功率(蓝色)和抽运功率(绿色)的波动曲线

Fig. 4 (a) Repetition rate (red) and the corresponding output power (blue) versus the pump power of LD1; fluctuations of repetition rate (red), output power (blue) and pump power (green) with initial pump power of (b) 78 mW and (c) 114 mW from LD1

同样地,为LD1选取了两个不同的静态工作点,并分别对LD1的输出功率、锁模激光器的输出功率以及重复频率进行了测量。当LD1静态工作点选取在78 mW时,激光器的重复频率(红色),输出功率(蓝色)和LD1抽运功率(绿色)的曲线如图4(b)所示。其中,重复频率峰-峰值的波动范围小于0.5 mHz,标准偏差

计算为 0.22 mHz 左右, 功率波动的标准偏差为 0.005 mW。当 LD1 静态工作点为 114 mW 时, 激光器输出特性曲线如图 4(c)所示。重复频率峰-峰值的波动范围增加至 3 mHz, 标准偏差为 0.72 mHz, 功率波动的标准偏差为 0.021 mW。与控制掺铒光纤的效果类似, LD1 选取中等抽运功率的静态工作点, 激光器输出功率的波动范围较小, 重复频率锁定精度较高。

4 结 论

采用共振增强非线性技术实现了 SESAM 锁模全保偏光纤激光器的重复频率的精密锁定。通过优化掺铒光纤长度及其抽运功率, 实现了长期的重复频率锁定。当掺铒光纤长度为 1.75 m 时, 重复频率的控制范围最大可达 180 Hz, 锁定后标准偏差为 165 μ Hz。此外, 发现采用共振增强的非线性技术锁定重复频率精度不受掺铒光纤长度变化的影响, 而与激光器抽运源 LD1 及重复频率锁定单元抽运源 LD2 的静态工作点密切相关。

参 考 文 献

- [1] Millot G, Pitois S, Yan M, *et al.* Frequency-agile dual-comb spectroscopy[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(1): 27-30.
- [2] Cingöz A, Yost D C, Allison T K, *et al.* Direct frequency comb spectroscopy in the extreme ultraviolet[J]. *Nature*, 2012, 482(7383): 68-71.
- [3] Jung K, Kim J. All-fibre photonic signal generator for attosecond timing and ultralow-noise microwave[J]. *Scientific Report*, 2015, 5: 16250.
- [4] Cao Shiying, Fang Zhanjun, Meng Fei, *et al.* Ti:sapphire femtosecond comb with two spectral broadening parts[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(8): 080601.
曹士英, 方占军, 孟飞, 等. 双路光谱展宽的钛宝石飞秒光学频率梳系统[J]. 物理学报, 2011, 60(8): 080601.
- [5] Wu Hanzhong, Cao Shiying, Zhang Fumin, *et al.* Spectral interferometry based absolute distance measurement using frequency comb[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(2): 020601.
吴翰钟, 曹士英, 张福民, 等. 光学频率梳基于光谱干涉实现绝对距离测量[J]. 物理学报, 2015, 64(2): 020601.
- [6] Wu Yuanjie, Ye Huiqi, Han Jian, *et al.* Astronomical laser frequency comb for high resolution spectrograph of a 2.16 m telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0614001.
吴元杰, 叶慧琪, 韩建, 等. 2.16 m 望远镜高分辨率光谱仪的天文光学频率梳[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0614001.
- [7] Han Hainian, Zhang Wei, Wang Peng, *et al.* Precise control of femtosecond Ti:sapphire laser frequency comb[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(5): 2760-2764.
韩海年, 张炜, 王鹏, 等. 飞秒钛宝石光学频率梳的精密锁定[J]. 物理学报, 2007, 56(5): 2760-2764.
- [8] Zhao Chunbo, Wu Tengfei, Liang Zhiguo. Research on repetition rate locking system of femtosecond laser[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2014, 34(6): 22-25.
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]. 计测技术, 2014, 34(6): 22-25.
- [9] Feng Y, Xu X, Hu X, *et al.* Environmental-adaptability analysis of an all polarization-maintaining fiber-based optical frequency comb[J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 17549-17559.
- [10] Shen X L, He B Q, Zhao J, *et al.* Repetition rate stabilization of an erbium-doped all-fiber laser via opto-mechanical control of the intracavity group velocity[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(3): 031117.
- [11] Rieger S, Hellwig T, Walbaum T, *et al.* Optical repetition rate stabilization of a mode-locked all-fiber laser[J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 4889-4895.
- [12] Yang K W, Hao Q, Zeng H P. All-optical high-precision repetition rate locking of an Yb-doped fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(8): 852-855.
- [13] Hao Q, Zhang Q S, Chen F H, *et al.* All-optical 20- μ Hz-Level repetition rate stabilization of mode locking with a nonlinear amplifying loop mirror[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(11): 2833-2837.