

超短脉冲偏振保持掺镱光纤激光器

连富强^{1,2} 余锦¹ 牛岗³ 麻云凤¹ 张晓雷³ 赵天卓¹ 樊仲维^{1,3}

¹ 中国科学院光电研究院, 北京 100094
² 中国科学院大学, 北京 100049
³ 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100190

摘要 报道了一个被动锁模线性腔皮秒光纤激光器, 实验中利用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 和光纤光栅构成了激光器的线性腔结构, 利用 SESAM 实现了激光器的被动锁模, 激光器内光纤结构采用保偏光纤实现了激光器的线性偏振态输出, 研制光纤式 SESAM 实现了光纤激光器的全光纤密闭结构。得到的锁模脉冲的重复频率为 40 MHz, 脉冲宽度为 25 ps, 3 dB 光谱宽度为 0.12 nm, 激光器锁模阈值输出功率为 8 mW, 可以实现稳定锁模的最大平均功率为 19 mW。通过射频谱仪对锁模脉冲的检测可以证明锁模脉冲序列中没有掺杂调 Q 锁模。

关键词 超快光学; 被动锁模; 可饱和吸收体; 全正色散

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s102002

Ultrafast All-Polarization-Maintaining Yb-Doped Fiber Laser

Lian Fuqiang^{1,2} Yu Jin¹ Niu Gang³ Ma Yunfeng¹ Zhang Xiaolei³
Zhao Tianzhuo¹ Fan Zhongwei^{1,3}

¹ Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100094, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ Beijing GK Laser Technology Co., Ltd., Beijing 100190, China

Abstract This paper reports a passively mode locked fiber laser from a linear cavity. It consists of semiconductor saturable absorption mirror (SESAM) and fiber Bragg grating. Another function of the SESAM is to achieve passive mode locking based on saturable absorption. The polarization of picosecond pulses is maintained by polarization maintaining fiber. All-fiber structure of fiber laser is achieved by a homemade fiber coupled SESAM. Repetition rate of mode locked trains of 40 MHz, pulse width of 25 ps, spectral width of 0.12 nm, mode locked threshold average laser power of 8 mW, and the maximum laser power of 19 mW are obtained. Mode locked train without Q-switched mode locking is proved by radio frequency (RF) spectrometer.

Key words ultrafast optics; passive mode locking; saturable absorber; all normal dispersion

OCIS codes 140.3480; 140.4050; 140.7090

1 引言

高功率、高光束质量的超短脉冲激光器逐步得到了广泛的应用, 其应用领域包括工业高精细冷加工、高效谐波变换和天文测距等。目前大功率皮秒激光器通常采用主振荡功率放大技术 (MOPA), 因此提供一个体积小、光束质量好的皮秒种子源是该领域研究的重点, 而光纤皮秒激光器正好可以满足上述要

求。2007 年, 以色列的 Katz 等^[1] 利用保偏光纤搭建了线性腔锁模光纤激光器, 实现了 3.6 ps 的锁模脉冲, 重复频率为 45 MHz, 平均功率为 1 mW。但是上述激光器并不是封闭结构, 在半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 前端存在透镜组对光束进行聚焦, 这种方案会降低激光器工作的稳定性, 没有完全体现光纤可以实现密闭结构的优点。2007 年, 清华大学的王旌等^[2] 在普通的单模光纤中插入半导体可饱和吸收镜

收稿日期: 2013-04-01; 收到修改稿日期: 2013-05-20

基金项目: 中国科学院光电研究院“雏鹰计划”

作者简介: 连富强 (1985—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤皮秒激光器和放大器等方面的研究。

E-mail: lfq850703@126.com

作为非线性器件,实现了自启动锁模,输出脉宽 442 fs,脉冲谱宽 6.35 nm,时间带宽积为 0.320。2009 年,国防科学技术大学的陈胜平等^[3]利用半导体可饱和吸收镜和光纤光栅组成的线性腔研制了一台锁模掺镱光纤激光器,种子最大平均功率可达到 9.2 mW,重复频率为 29.6 MHz,脉宽约为 36 ps。上述两种方案没有实现激光器稳定的线性偏振输出,这不利于后期利用电光晶体对锁模脉冲的选单和放大。本文设计了一种线性腔锁模光纤激光器,可以满足上面所述的全光纤结构以及稳定线性偏振输出的要求。

2 实验装置

如图 1 所示,激光器采用典型的线性腔结构[法布里-珀罗(F-P)腔], SESAM 和光纤布拉格光栅

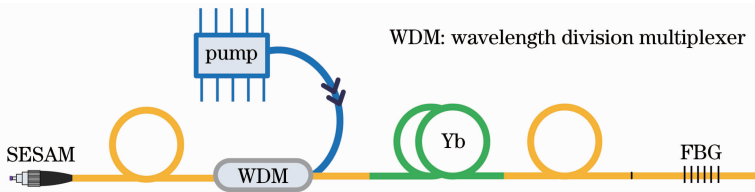


图 1 线性腔锁模光纤激光器装置图

Fig. 1 Experimental schematic of linear cavity mode locked fiber laser

SESAM 吸收系数为 50%,调制深度为 10%,饱和通量为 $19 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。SESAM 的参数确定源于 SESAM 抑制调 Q 锁模条件^[4],即

$$F_{P,A}^2 > F_{\text{sat,L}} F_{\text{sat,A}} \Delta R \frac{A_{\text{eff,L}}}{A_{\text{eff,A}}}, \quad (2)$$

式中 $F_{P,A}$ 定义为 SESAM 的脉冲通量, $F_{\text{sat,L}}$ 和 $F_{\text{sat,A}}$ 分别为增益光纤和 SESAM 的饱和通量, ΔR 为 SESAM 的调制深度, $A_{\text{eff,L}}$ 和 $A_{\text{eff,A}}$ 分别为增益光纤和 SESAM 内的光斑面积。(2)式的右边被称为调 Q 锁模参数,只有当(2)式左边 SESAM 的脉冲通量的平方大于(2)式右边的调 Q 锁模参数时激光器才能输出稳定的锁模脉冲,否则激光器只能保持不稳定的调 Q 锁模状态。通过(2)式的计算,在现有商用的 SESAM 产品中选取了实验中采用的参数。

激光器的抽运方式采用正向抽运(抽运光传播方向与激光输出方向同向),激光器谐振腔总腔长为 2.5 m,采用了高掺杂浓度的双包层保偏增益光纤作为增益介质,掺镱增益光纤长度为 25 cm,纤芯吸收系数为 1200 dB/m(976 nm 处),纤芯数值孔径为 0.15,纤芯与包层直径分别为 $6 \mu\text{m}$ 和 $125 \mu\text{m}$,模式双折射高达 2×10^{-4} ;抽运源采用最高输出功率为 400 mW 的半导体激光器,输出光纤是普通的单模光纤,波分复用器(WDM)采用了滤波片与光纤耦

(FBG)充当了线性腔的两个端镜,FBG 作为输出镜实现激光器的输出,其采用了纤芯与包层直径分别为 $6 \mu\text{m}$ 和 $125 \mu\text{m}$ 的保偏光纤,光栅结构沿保偏光纤的慢轴刻写,中心波长为 1064 nm,光谱宽度为 0.15 nm,反射率为 60%。光纤光栅带宽的确定是源于对锁模脉宽的限制,即

$$\tau = \frac{2\pi}{(2N+1)\Omega} = \frac{1}{\Delta\nu}, \quad (1)$$

式中 τ 为傅里叶变换极限时的锁模脉冲宽度, Ω 为相邻纵模的角频率差值, N 为正整数, $2N+1$ 为腔内纵模数, $\Delta\nu$ 为被锁定纵模的线宽。经计算当光纤光栅的光谱宽度为 0.15 nm 时,傅里叶变化极限下的锁模脉冲宽度为 12.58 ps,这意味着如果腔内没有色散的影响,则激光器输出的锁模脉冲宽度是 12.58 ps。

合的方式,与滤波片耦合的光纤同样采用了保偏光纤,数值孔径接近 0.15,抽运光经过 WDM 内部镜片的反射耦合进增益光纤。

3 实验结果与分析

在抽运功率达到 80 mW 时,激光器可以实现稳定的锁模,此时激光功率为 8 mW,随着抽运功率的增加激光功率呈线性增加,如图 2 所示。最大的抽运功率为 120 mW,此时的激光功率为 19 mW,当抽运功率超过 120 mW 时激光器的锁模会变得不稳定,从最初的稳定锁模状态变为多脉冲状态。

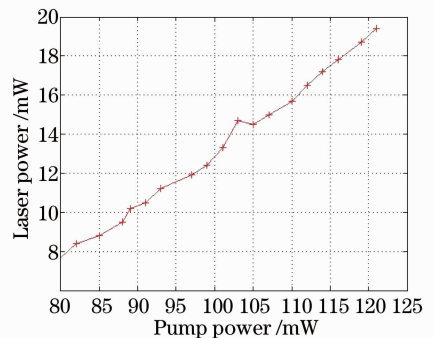


图 2 激光器在不同抽运功率下的输出功率

Fig. 2 Laser output power versus pump power

激光器稳定锁模和多脉冲状态如图 3 所示，稳定锁模时重复频率为 40 MHz，而多脉冲状态的重复频率为 190 MHz，并且此时的多脉冲发生后的脉

冲间隔不相等，原来的脉冲与新产生的时间间隔为 7 ns。目前还无法解释 7 ns 时间间隔产生的原因，这一现象在后续的工作中将继续研究。

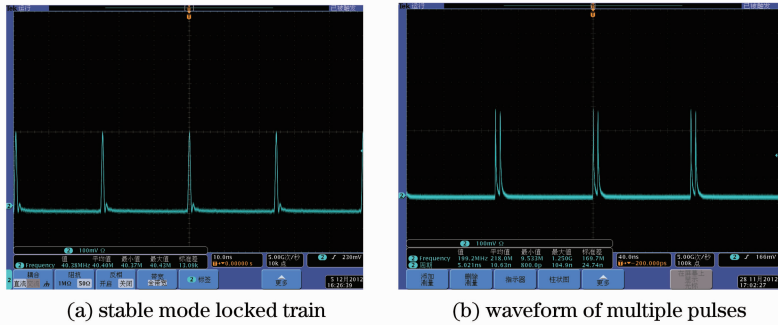


图 3 激光器不同抽运功率下的输出波形

Fig. 3 Laser output waveforms under different pump powers

锁模的光谱图形如图 4(a) 所示，红颜色的“+”曲线为锁模阈值时的光谱图形，随着抽运功率的增加，可以发现在光谱的前沿出现了次峰，而这时的抽运功率正是多脉冲产生时的抽运功率。这一现象可以理解为在抽运功率增加后，腔内的锁模脉冲功率已经足以使 SESAM 饱和，此时如果继续增加抽运功率，那么额外的抽运功率将会导致 SESAM 更加深度的饱和，使得偏离中心波长的纵模的反射率继续增加，此时由 SESAM 反射回的纵模强度增加，反转粒子数的提取能力增强，与原来的中心波长处的纵模形成了竞争关系，所以在光谱的前沿出现了一个次峰，但次峰的出现只是瞬间的，光谱并不会一直停留在次峰出现的状况，而是在次峰出现后马上又恢复到一个完整的高斯脉冲形状^[5]。图 4(b) 是在

激光输出功率分别为 8 mW 和 13 mW 时的锁模脉冲射频频谱，红色曲线为锁模阈值时激光输出功率为 8 mW 时的射频频谱，可以看出锁模脉冲主峰与噪声背底相差大于 60 dB，而当激光功率达到 13 mW 时锁模脉冲的主峰与背底相差更是大于 80 dB，说明在这两个不同的输出功率情况下激光器锁模中没有包含调 Q 锁模，证明了激光器具有很高的锁模质量。而从图 4(b) 中蓝色曲线也可以发现此时在脉冲的前后沿出现了一个底座，称之为相位噪声，其产生的原因是此时激光器的脉冲能量较高，导致锁模脉冲经过射频频谱仪内混频器时引起了非线性效应，所以此时观察到的脉冲底座是由仪器内部产生的，图形中主脉冲两侧的峰值代表了增益光纤内的弛豫振荡过程^[6]，与调 Q 锁模无关。

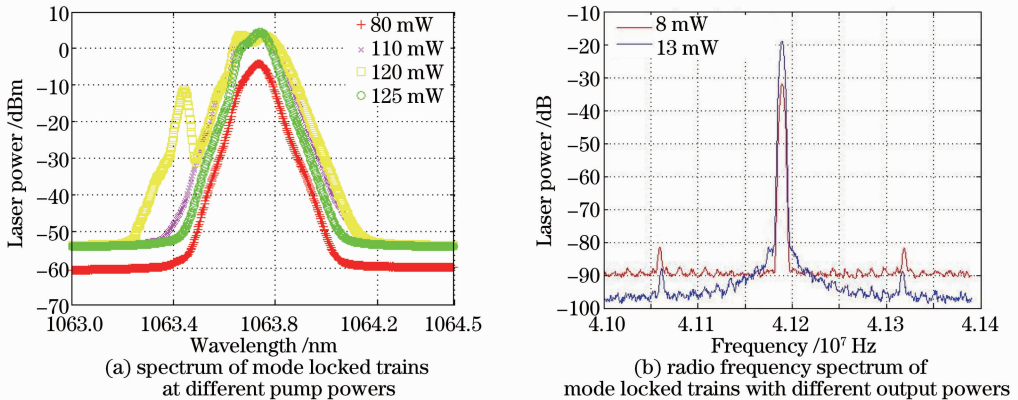


图 4 不同功率情况下锁模的光谱和射频频谱图形

Fig. 4 Spectra and radio frequency spectra of different powers

锁模脉冲强度自相关曲线如图 5 所示。实验测得锁模脉冲宽度为 25 ps，比傅里叶变换极限下的锁模脉冲宽度 12.58 ps 要宽，这主要是因为，在激光器谐振腔中没有色散补偿的器件，锁模脉冲完全在全

正色散的介质中传播，锁模导致了脉冲的展宽，经计算此时的时间带宽积为 0.795。实验中利用 1/2 波片、偏振分束器 (PBS) 和功率计对锁模脉冲的偏振态进行了测试，在激光功率输出为 14 mW 时，经过

1/2 波片的调节可以使得通过 PBS 的水平偏振光功率近似等于 13 mW,垂直偏振光功率小于 1 mW,因实验中所用功率计极限分辨率是 1 mW,因此此时测量的消光比大于 13:1。将种子输出的光进行了一级光纤放大,在放大后功率为 120 mW 时按照上述的方法测量消光比发现放大后的消光比大于 100:1,证明了输出的锁模脉冲为线性偏振光。

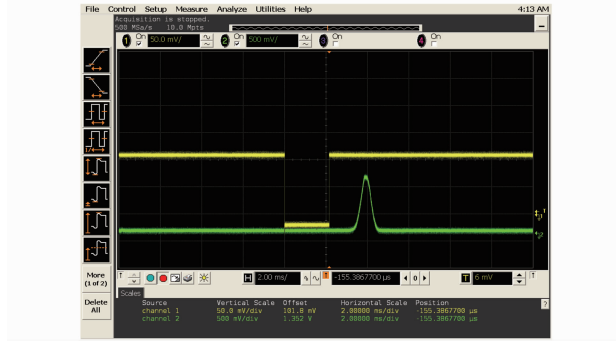


图 5 锁模脉冲自相关波形

Fig. 5 Autocorrelation waveform of mode locked trains

4 结 论

通过光纤激光器线性腔 SESAM 锁模,获得了最大平均功率为 19 mW 的皮秒线性偏振光输出,锁模脉冲宽度为 25 ps,3 dB 光谱带宽为 0.12 nm,3 dB 光

谱线宽为 3179 GHz,分别从锁模波形和光谱的角度讨论了光纤锁模激光器产生多脉冲的原因,结合所测射频频谱图形证明了激光器锁模过程不含有调 Q 锁模,同时利用光纤式 SESAM 实现了线性腔锁模光纤激光器全光纤结构。

参 考 文 献

- 1 O Katz, Y Sintov, Y Nafcha, *et al.*. Passively mode-locked ytterbium fiber laser utilizing chirped fiber Bragg gratings for dispersion control[J]. *Opt Commun*, 2007, 269(1): 156–165.
- 2 Wang Jing, Zhang Hongming, Zhang Jun, *et al.*. Passively mode locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(2): 163–165.
王 旌, 张洪明, 张 隰, 等. 基于饱和吸收镜的被动锁模光纤激光器[J]. *中国激光*, 2007, 34(2): 163–165.
- 3 Chen Shengping, Lin Dongfeng, Hou Jing, *et al.*. Passively mode locked ytterbium doped fiber laser with 2 W average output power[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(11): 2817–2821.
陈胜平, 林东风, 侯 静, 等. 平均功率近 2 W 的被动锁模皮秒掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 2817–2821.
- 4 C Hönninger, R Paschotta, F Morier-Genoud, *et al.*. Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking [J]. *J Opt Soc Am B*, 1999, 16(1): 46–56.
- 5 Fuqiang Lian, Zhongwei Fan, Gang Niu. Low repetition-rate all-normal-dispersion mode locking laser based on SESAM [C]. *ICEO*, 2011, 2: 332–334.
- 6 Louis McDonagh, Richard Wallenstein. 111 W, 110 MHz repetition-rate, passively mode-locked TEM₀₀ Nd:YVO₄ master oscillator power amplifier pumped at 888 nm[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(10): 1259–1261.

栏目编辑:宋梅梅