

高功率被动锁模 2.0 μm 掺铥飞秒脉冲光纤激光器

刘 江 王 璞

(北京工业大学激光工程研究院, 国家产学研激光技术中心, 北京 100124)

摘要 报道了高功率半导体可饱和吸收镜被动锁模的 2.0 μm 掺铥飞秒脉冲光纤激光器的实验结果。该光纤激光器利用半导体可饱和吸收镜与宽带全反射镜来构成线型法布里-珀罗腔, 自制的 1550 nm 连续掺铒光纤激光器作为激光抽运源。当抽运功率为 312 mW 时, 开始得到稳定的重复频率为 53 MHz 的锁模激光脉冲串。当抽运功率增加到 472 mW 时, 得到的最大平均输出功率为 50 mW, 相应的最高单脉冲能量为 0.94 nJ; 此时测得锁模激光脉冲的宽度为 907 fs, 激光的中心波长为 1939.5 nm, 3 dB 光谱带宽为 4.6 nm。

关键词 光纤光学; 光纤激光器; 掺铥光纤; 被动锁模; 飞秒脉冲

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0902001

High-Power Passively Mode-Locked Thulium-Doped Femtosecond Fiber Laser at 2.0 μm

Liu Jiang Wang Pu

(National Center of Laser Technology, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract High pulse-energy semiconductor saturable absorber mirror passively mode-locked thulium-doped femtosecond fiber laser is reported. Based on a linear Fabry-Perot cavity by the combination of semiconductor saturable absorber mirror and broadband reflective mirror, the thulium-doped fiber is pumped by a home-made Er-doped fiber laser at 1550 nm. Stable mode-locked laser pulse train occurs at 312 mW incident pump power and the pulse repetition rate is 53 MHz in such a linear cavity configuration. When the incident pump power is 472 mW, the maximum output power is 50 mW, corresponding to the maximum single pulse energy of 0.94 nJ. The pulse width is measured to be 907 fs; the laser center wavelength and the 3 dB spectral bandwidth are 1939.5 nm and 4.6 nm, respectively.

Key words fiber optics; fiber laser; thulium-doped fiber; passively mode-locked; femtosecond pulse

OCIS codes 140.3510; 140.7090; 140.4050; 140.3070

1 引 言

现代新型激光源的研究与发展趋势可概括为: 更高平均功率、更高脉冲能量、更短脉冲宽度以及更宽的光谱范围(向紫外短波长、中红外长波长延伸)。其中以掺铥或铥钬共掺光纤为工作物质的 2.0 μm 波段光纤激光器在高平均功率、高可靠性等方面具有其他类型 2.0 μm 波段激光器所不能比拟

的优势。2.0 μm 波段掺铥光纤激光器可广泛应用于人眼安全雷达、激光医疗、激光传感以及特殊材料加工等。此外, 2.0 μm 波段掺铥光纤激光器还可作为中红外激光的抽运源, 从而产生 2.0~5.0 μm 波段范围内的中红外激光输出^[1,2]。2.0~5.0 μm 波段范围内的激光在大气探测、激光雷达、光电对抗等应用领域具有重要地位, 也是近年来国内外新型激

收稿日期: 2012-04-06; 收到修改稿日期: 2012-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(61177048)和北京市自然科学基金重点项目(KZ2011100050011)资助课题。

作者简介: 刘 江(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率光纤激光器、高功率光纤放大器等方面的研究。

E-mail: liujiang@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 王 璞(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤激光器、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件等方面的研究。E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

光源研究的热点之一。

近年来,国际上 2.0 μm 波段掺铥光纤激光器的研究和应用实现了突破性进展,掺铥连续光纤激光器的输出功率已达千瓦量级^[3],掺铥单频光纤激光器的输出功率达到 600 W^[4],而掺铥超短脉冲光纤激光器的研究也取得了令人瞩目的进展。2008 年,Solodyankin 等^[5]利用碳纳米管作为可饱和吸收体实现了被动锁模的皮秒脉冲掺铥光纤激光器,激光输出的中心波长为 1930 nm,平均功率为 3.4 mW,重复频率为 37 MHz,脉冲宽度为 1.32 ps^[5]。2009 年,Kieu 等^[6]也利用碳纳米管作为可饱和吸收体,实现了中心波长为 1885 nm 的飞秒激光脉冲输出,最大平均输出功率为 25 mW,重复频率为 45 MHz,脉冲宽度为 750 fs,相应的单脉冲能量为 0.5 nJ,3 dB 光谱带宽为 6 nm。2011 年,Kivistö 等^[7]利用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 作为可饱和吸收体、1560 nm 的单模连续掺铥光纤激光器作为抽运源、直径为 6 μm 的单包层铥钕共掺光纤作为激光增益介质实现了 1990 nm 的锁模激光脉冲输出,激光平均输出功率为 8 mW,重复频率为 38.8 MHz,相应的激光脉冲宽度为 600 fs,3 dB 光谱带宽为 6.8 nm。同年 Wang 等^[8]采用非线性偏振旋转的方法,也实现了重复频率为 9.78 MHz 的飞秒激光脉冲输出,最大平均输出功率为 1.5 mW,相应的单脉冲能量为 0.15 nJ,脉冲宽度为 770 fs,激光中心波长为 1982 nm,3 dB 光谱带宽为 5.2 nm。以上报道的结果虽然实现了飞秒激光脉冲输出,但平均输出功率相对较低,最高单脉冲能量也只有 0.5 nJ^[6],而国内尚未见 2.0 μm 掺铥飞秒脉冲光纤激光器的报道。

本文报道了高功率线型腔结构的 2.0 μm 掺铥飞秒脉冲光纤激光器。该光纤激光器利用 SESAM 与宽带全反射镜来构成线型法布里-珀罗腔,自制的中心波长为 1550 nm 的连续掺铥光纤激光器作为抽运源,从而得到了重复频率为 53 MHz、脉冲宽度为 907 fs 的锁模激光脉冲输出。

2 实验装置

如图 1 所示,高功率被动锁模 2.0 μm 掺铥飞秒脉冲光纤激光器采用了线型法布里-珀罗腔结构设计。为了控制整个激光腔的色散,没有采用环形腔结构^[9]。整个线型激光谐振腔总长度控制在 1.8 m 左右。激光抽运源采用自制的中心波长为 1550 nm 的连续掺铥光纤激光器,最大平均输出功

率为 900 mW。抽运光通过 1550/2000 nm 波分复用器(WDM)的抽运输入端进入掺铥增益光纤,掺铥增益光纤的长度约为 0.7 m,纤芯直径为 9.0 μm ,数值孔径为 0.16。该增益光纤在 1550 nm 处纤芯抽运吸收率约为 20 dB/m,在 2.0 μm 波段其色散值约为 $-0.064 \text{ ps}^2/\text{m}$ 。为了得到更窄的激光脉冲宽度,实验中尽量使激光腔内的总色散趋近于零。由于激光器中无源光纤在 2.0 μm 波段的色散值约为 $-0.07 \text{ ps}^2/\text{m}$,因此尽量缩短激光腔内无源光纤的长度来控制腔内的负色散,最后整个激光器的总色散约为 -0.1218 ps^2 。1550/2000 nm 波分复用器的信号端熔接一个分束比为 30/70 的激光分束器,分束器 70% 的一端作为激光信号输出端,30% 的一端与光纤耦合输出的反射式结构的 SESAM 熔接。SESAM 来自 BATOP 公司,其恢复时间为 500 fs。单包层掺铥增益光纤的另一端与宽带全反射镜直接耦合,且耦合效率高于 90%。为了避免菲涅耳反射影响稳定的锁模状态,激光输出端 8° 角切割。

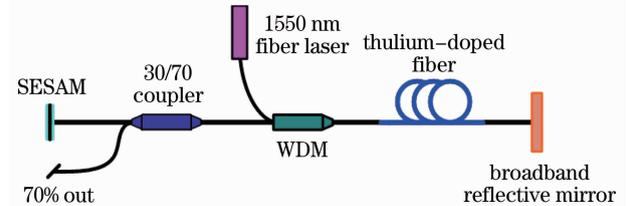


图 1 被动锁模掺铥飞秒脉冲光纤激光器实验装置图

Fig. 1 Schematic setup of the passively mode-locked thulium-doped femtosecond fiber laser

3 实验结果与分析

在连续掺铥光纤激光器的输出功率为 312 mW 时,通过示波器和高速光电探头观察到光纤激光器开始产生稳定的重复频率为 53 MHz 的自启动锁模激光脉冲,其重复频率与激光器的总腔长相吻合。图 2 为 25 GHz 的实时示波器和高速光电探头测得的锁模激光脉冲串,当抽运功率小于 472 mW 时,总是产生稳定的单脉冲,没有观察到脉冲分裂或者多脉冲现象。此外,锁模光纤激光的平均输出功率随抽运功率几乎呈线性增加,如图 3 所示。当抽运功率增加到 472 mW 时,最大平均输出功率达到了 50 mW,相应的最高单脉冲能量达到了 0.94 nJ,进一步增加抽运功率锁模激光脉冲将发生脉冲分裂现象。由于在激光谐振腔中采用了 70% 的高输出比输出,激光腔内功率密度相对较低,从而有效抑制了激光的谐波锁模,因此单脉冲输出时得到了较高的

平均输出功率。

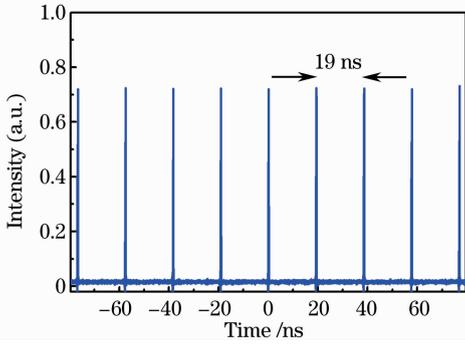


图 2 被动锁模掺铥飞秒脉冲光纤激光器的脉冲串
Fig. 2 Pulse train of the passively mode-locked thulium-doped femtosecond fiber laser

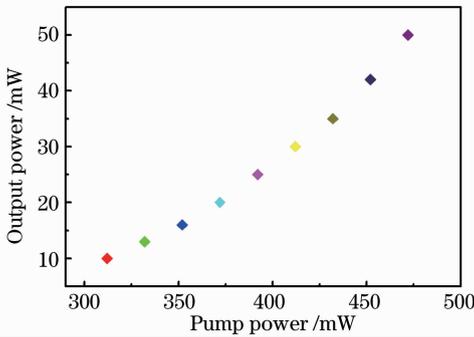


图 3 平均输出功率随抽运功率的变化
Fig. 3 Average output power with the increase of pump power

图 4 为 2.0 μm 被动锁模掺铥飞秒脉冲光纤激光器的输出光谱,采用分辨率为 0.05 nm 的光谱分析仪(Yokogawa AQ6375)测得锁模激光脉冲的中心波长为 1939.5 nm,3 dB 光谱带宽为 4.6 nm。由于整个掺铥光纤激光器工作在负色散状态,因此锁模激光的光谱形状表现出明显的孤子锁模特征。图 5 为自相关仪测得的锁模激光脉冲的自相关信号,其半峰全宽为 1.4 ps,假设脉冲形状为双曲正割

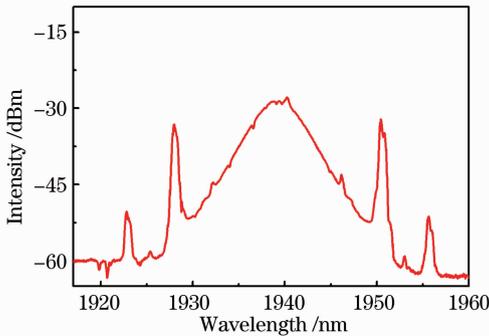


图 4 被动锁模掺铥飞秒脉冲光纤激光器的输出光谱
Fig. 4 Optical spectrum of the passively mode-locked thulium-doped femtosecond fiber laser

型,则锁模激光的脉冲宽度 $\tau_{\text{pulse}} = 907$ fs,脉冲的时间带宽积为 0.33,略大于傅里叶变换极限,此时,锁模激光脉冲的峰值功率高达 1036 W。为了研究锁模激光脉冲的稳定性,采用 7.5 GHz 的频谱分析仪测得锁模激光脉冲的信噪比大于 70 dB,表明锁模激光脉冲非常稳定。另外,也对整个掺铥飞秒脉冲光纤激光器的输出功率、输出光谱进行了长达 4 h 的监测,没有发现较为明显的波动,从而也充分证明该飞秒脉冲光纤激光器稳定性较高,适于工业化应用。

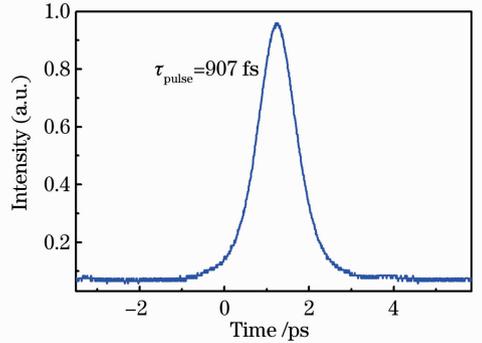


图 5 被动锁模掺铥飞秒激光脉冲的自相关信号
Fig. 5 Autocorrelation trace of the passively mode-locked thulium-doped femtosecond laser pulse

4 结 论

本文报道了结构简单的 2 μm 波段高功率掺铥飞秒脉冲光纤激光器。整个光纤激光器采用线型法布里-珀罗腔结构设计,通过控制激光腔的总色散从而实现光纤振荡器直接输出脉冲宽度为 907 fs 的被动锁模激光脉冲。激光最大平均输出功率达到了 50 mW、重复频率为 53 MHz,相应的激光峰值功率为 1036 W,激光中心波长为 1939.5 nm,3 dB 光谱带宽为 4.6 nm。此类高功率飞秒脉冲光纤激光器可望在激光雷达、气体传感以及光谱分析等领域广泛应用。

参 考 文 献

- 1 P. Kulkarni, V. V. Alexander, M. Kumar *et al.*. Supercontinuum generation from ~1.9 to 4.5 μm in ZBLAN fiber with high average power generation beyond 3.8 μm using a thulium-doped fiber amplifier[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2011, **28**(10): 2486~2498
- 2 M. Eckerle, C. Kieck, J. Świdorski *et al.*. Actively Q-switched and mode-locked Tm³⁺-doped silicate 2 μm fiber laser for supercontinuum generation in fluoride fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(4): 512~514
- 3 P. F. Moulton, G. A. Rines, E. Slobodtchikov *et al.*. Tm-doped fiber lasers: fundamentals and power scaling[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(1): 85~92
- 4 G. D. Goodno, L. D. Book, J. E. Rothenberg. Low-phase-

- noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(8): 1204~1206
- 5 M. A. Solodyankin, E. D. Obraztsova, A. S. Lobach *et al.*. Mode-locked 1.93 μm thulium fiber laser with a carbon nanotube absorber[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(12): 1336~1338
- 6 K. Kieu, F. W. Wise. Soliton thulium-doped fiber laser with carbon nanotube saturable absorber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(3): 128~130
- 7 S. Kivistö, O. G. Okhotnikov. 600-fs mode-locked Tm-Ho-doped fiber laser synchronized to optical clock with optically driven semiconductor saturable absorber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(8): 477~479
- 8 Q. Wang, T. Chen, B. Zhang *et al.*. All-fiber passively mode-locked thulium-doped fiber ring oscillator operated at solitary and noiselike modes[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(19): 3750~3752
- 9 Liu Jiang, Xu Jia, Wang Qian *et al.*. High-pulse-energy passively mode-locked 2.0 μm thulium-doped ultrafast all-fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0602009
- 刘江, 徐佳, 王潜等. 高能量全光纤结构被动锁模 2.0 μm 掺铥超短脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0602009

栏目编辑: 宋梅梅