

# 高能量全光纤结构被动锁模 2.0 $\mu\text{m}$ 掺铥 超短脉冲光纤激光器

刘江 徐佳 王潜 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** 报道了高脉冲能量全光纤结构半导体可饱和吸收镜锁模的 2.0  $\mu\text{m}$  波段掺铥超短脉冲光纤激光器。在抽运功率为 1.8 W 时, 开始得到稳定的重复频率为 14.3 MHz 的锁模激光脉冲, 平均输出功率为 5 mW; 当抽运功率增加到 3.8 W 时, 最大平均输出功率达到 59 mW, 相应的最高单脉冲能量为 4.1 nJ。此时测得锁模激光脉冲的脉宽为 2.2 ps, 中心波长为 2015 nm, 3 dB 光谱带宽为 2.9 nm。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 超快激光; 掺铥光纤; 被动锁模

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0602009

## High-Pulse-Energy Passively Mode-Locked 2.0 $\mu\text{m}$ Thulium-Doped Ultrafast All-Fiber Laser

Liu Jiang Xu Jia Wang Qian 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 mode-locked 2.0  $\mu\text{m}$  thulium-doped ultrafast all-fiber laser is reported. Stable mode-locked pulse train occurred at 1.8 W incident pump power and the pulse repetition rate is 14.3 MHz in a ring cavity configuration. Increasing the incident pump power to 3.8 W, the maximum output power is 59 mW, corresponding to the maximum single pulse energy of 4.1 nJ. The pulse width is measured to be 2.2 ps, the center wavelength and the spectral bandwidth are 2015 nm and 2.9 nm respectively.

**Key words** lasers; fiber laser; ultrafast laser; thulium-doped fiber; passively mode-locked

**OCIS codes** 140.3510; 140.7090; 140.4050; 140.3070

## 1 引 言

光纤激光器与气体激光器、固体激光器相比, 具有电光转换效率高、体积小、光束质量好等优点, 可广泛应用于材料加工、军事国防、科学研究等领域。而铥掺杂或铥钬共掺的光纤激光器可以发射出 2.0  $\mu\text{m}$  波段的激光, 也可实现 1.7~2.1  $\mu\text{m}$  波段宽调谐; 还可以通过上转换方式实现其他波段的激光输出<sup>[1~4]</sup>。由于 2.0  $\mu\text{m}$  波段输出的激光正处于人眼安全波段范围内, 并且水分子有很强的中红外吸

收峰, 因此 2.0  $\mu\text{m}$  波段掺铥或铥钬共掺光纤激光器在激光手术、激光雷达、超快光学等领域有着更加重要的应用前景。此外, 2.5~5.0  $\mu\text{m}$  和 8.0~12.0  $\mu\text{m}$  波段是两个大气传输窗口, 此波段的激光在激光雷达、光电对抗和激光通讯等军事应用上极其重要, 高功率 2.0  $\mu\text{m}$  波段掺铥或铥钬共掺光纤激光器可作为中红外激光源的抽运源, 从而实现 1.0~5.0  $\mu\text{m}$  波段范围内的激光输出<sup>[5]</sup>。目前, 在连续掺铥光纤(TDF)激光器方面, 国外的研究组已

**收稿日期**: 2012-01-01; **收到修改稿日期**: 2012-02-23

**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和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、光纤放大器和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)

经实现了近千瓦量级的平均功率输出<sup>[6]</sup>;在纳秒脉冲 TDF 激光器方面, Kivistö 等<sup>[7]</sup>报道了基于半导体可饱和吸收镜(SESAM)被动调 Q 的铥钛共掺的纳秒脉冲光纤激光器,其平均输出功率为 800 mW,脉冲宽度为 20 ns;而在超短脉冲 TDF 激光器方面, Haxsen 等<sup>[8]</sup>报道了空间结构的高脉冲能量 SESAM 锁模的 TDF 激光器,最大平均输出功率为 203 mW,单脉冲能量高达 5.4 nJ。Solodyankin 等<sup>[9]</sup>报道了利用碳纳米管作为可饱和吸收体被动锁模的皮秒脉冲 TDF 激光器,平均输出功率为 3.4 mW,重复频率为 37 MHz,脉冲宽度为 2.0 ps;最近,本课题组采用新型功能材料氧化石墨烯作为可饱和吸收体也实现了 2.0 μm 波段 TDF 激光器的模式锁定,产生了 1.8 mW 的平均输出功率,相应的单脉冲能量为 0.56 nJ。此外,国内还有多家单位也开展了 2.0 μm 波段 TDF 激光器的研究,但绝大部分的工作都集中于传统空间结构的连续 TDF 激光器的研究,激光系统结构复杂、环境稳定性差,从而限制了其在某些领域的广泛应用。被动锁模的 2.0 μm 波段掺铥或铥钛共掺的超短脉冲光纤激光器的研究国内还未见报道。

本文采用 SESAM 作为激光锁模器件,双包层单模 TDF 作为激光增益介质,实现了高脉冲能量 2.0 μm 波段皮秒激光脉冲输出。

## 2 实验装置

如图 1 所示,高能量被动锁模掺铥超短脉冲光纤激光器采用了全光纤、环形腔结构设计,整个激光器总腔长大约为 14 m,而环形腔结构设计也抑制了激光自脉冲的产生。激光抽运源为光纤耦合输出的中心波长 790 nm 的多模半导体激光器,最大平均输出功率为 5 W;抽运光通过合束器的抽运输入端进入掺铥增益光纤,6 m 长的双包层单模 TDF (793 nm 处包层抽运吸收率为 1.3 dB/m)作为激光增益光纤,TDF 的纤芯直径为 6.0 μm,数值孔径为 0.23,内包层直径为 125 μm,数值孔径为 0.45。激光器中无源光纤在 2.0 μm 波段处的色散值大约为 -0.07 ps<sup>2</sup>/m,而铥掺杂双包层增益光纤的色散值大约为 -0.078 ps<sup>2</sup>/m,因此整个激光器的总色散大约为 -1.028 ps<sup>2</sup>。由于三端口环形器的隔离度大于 40 dB,从而保证了激光脉冲的单向运转,环形器的最大插入损耗在 2.0 μm 波段大约为 4 dB,相对较高的插入损耗导致了激光锁模阈值的提高。而反射式结构的 SESAM 位于三端口环形器的第二端

口。锁模激光脉冲从激光分束器的 70% 的一端输出,30% 的一端反馈回激光腔内。

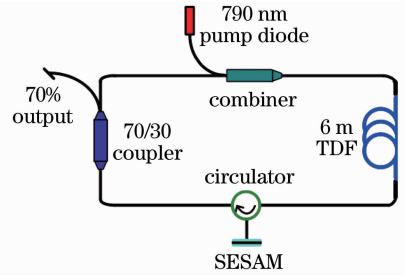


图 1 全光纤结构被动锁模掺铥超短脉冲光纤激光器实验装置图

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

## 3 实验结果与分析

在抽运功率为 1.8 W 时,光纤激光器开始产生稳定的重复频率为 14.3 MHz 的自锁模激光脉冲,其重复频率与激光器的总腔长相吻合。图 2 为通过 1 GHz 的示波器和 15 MHz 的光电探头测得的锁模激光脉冲串,当抽运功率小于 3.8 W 时,总是稳定的产生单脉冲,没有出现脉冲分裂或多脉冲现象,锁模光纤激光的平均输出功率几乎随抽运功率线性增加,如图 3 所示。当抽运功率增加到 3.8 W 时,平均输出功率为 59 mW,相应的最高单脉冲能量达到了 4.1 nJ,进一步增加抽运功率将产生脉冲分裂现象。

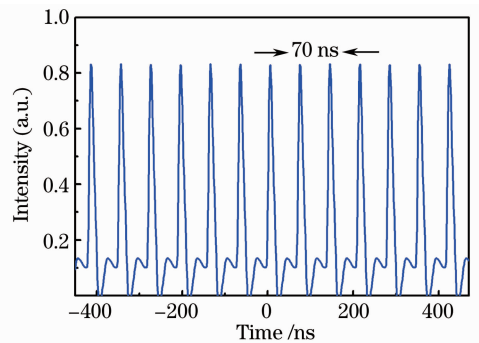


图 2 锁模掺铥超短脉冲光纤激光器的脉冲串

Fig. 2 Pulse train of the mode-locked thulium-doped fiber laser

如图 4 所示,为锁模掺铥超短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 2015 nm,3 dB 光谱带宽  $\omega_{1/2} = 2.9$  nm。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  $\omega_{1/2} = 3.4$  ps,假设脉冲形状为双曲

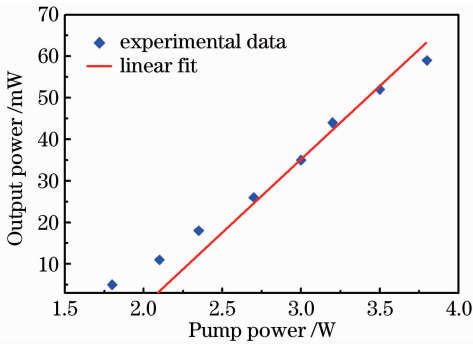


图3 平均输出功率随抽运功率的变化

Fig. 3 Average output power with the increase of pump power

正割型,则锁模激光脉冲的脉宽为 2.2 ps,脉冲的时间带宽积为 0.47,略大于傅里叶变换极限。此外,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,表明锁模激光脉冲比较稳定。

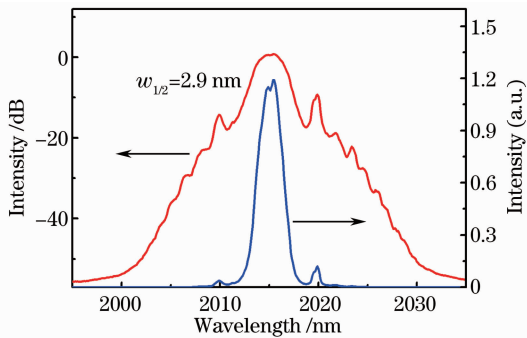


图4 锁模掺铥超短脉冲光纤激光器的输出光谱

Fig. 4 Optical spectrum of the mode-locked thulium-doped fiber laser

目前超短脉冲光纤激光器通常使用单模半导体激光器作为抽运源,由于单模半导体激光器的输出功率在百毫瓦量级,从而一定程度上限制了超短脉冲光纤激光器的单脉冲能量。为了得到更高的单脉冲能量,往往需要对光纤激光种子光进行多级放大,而放大过程不仅增加了激光系统的成本而且会对激光脉冲的性能及激光系统的稳定性造成一定的影响,很大程度上限制了超短脉冲光纤激光器的产业化应用。因此,直接从光纤激光振荡器获得高脉冲能量的超短激光脉冲输出有着非常重大的现实意义。

## 4 结 论

研究了全光纤结构、SESAM锁模的 2.0 μm波

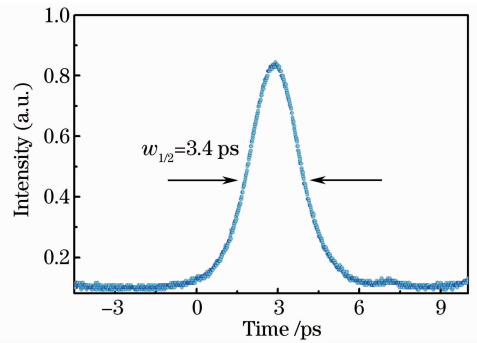


图5 锁模激光脉冲的自相关信号

Fig. 5 Autocorrelation trace of the mode-locked laser pulse

段掺铥超短脉冲光纤激光器。整个光纤激光器采用了环形腔结构设计,在抽运功率为 1.8 W 时,得到了稳定的重复频率为 14.3 MHz 的锁模激光脉冲输出,随着抽运功率的增加,其最大平均输出功率为 59 mW,相应的最高单脉冲能量为 4.1 nJ,激光脉冲的宽度为 2.2 ps。

## 参 考 文 献

- 1 L. E. Nelson, E. P. Ippen, H. A. Haus, Broadly tunable sub-500 fs pulses from an additive-pulse mode-locked thulium-doped fiber ring laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(1): 19~21
- 2 R. C. Sharp, D. E. Spock, N. Pan *et al.*. 190-fs passively mode-locked thulium fiber laser with a low threshold[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(12): 881~883
- 3 S. Kivistö, T. Hakulinen, M. Guina *et al.*. Tunable Raman soliton source using mode-locked Tm-Ho fiber laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(12): 934~936
- 4 Q. Wang, J. Geng, Z. Jiang *et al.*. Mode-locked Tm-Ho-codoped fiber laser at 2.06 μm[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(11): 682~684
- 5 C. R. Phillips, Carsten Langrock, J. S. Pelc *et al.*. Supercontinuum generation in quasi-phase-matched LiNbO<sub>3</sub> waveguide pumped by a Tm-doped fiber laser system[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(19): 3912~3914
- 6 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
- 7 S. Kivistö, R. Koskinen, J. Paajaste *et al.*. Passively Q-switched Tm<sup>3+</sup>, Ho<sup>3+</sup>-doped silica fiber laser using a highly nonlinear saturable absorber and dynamic gain pulse compression [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(26): 22058~22063
- 8 F. Haxsen, D. Wandt, U. Morgner *et al.*. Pulse characteristics of a passively mode-locked thulium fiber laser with positive and negative cavity dispersion [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(18): 18981~18988
- 9 M. A. Solodyankin, E. D. Obratsova, 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