

# 瓦级输出全光纤结构 2.0 $\mu\text{m}$ 掺铥皮秒脉冲 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** 研制了高功率全光纤结构 2  $\mu\text{m}$  波段掺铥皮秒脉冲光纤激光器。该激光器采用了主振荡功率放大(MOPA)结构设计,种子源采用 790 nm 的多模半导体激光器作为抽运源、双包层掺铥光纤作为激光增益介质、半导体可饱和吸收镜(SESAM)作为锁模器件,从而实现了重复频率为 10.4 MHz 的皮秒激光脉冲输出,其最大平均输出功率为 15 mW。种子源经过一级掺铥光纤放大器后,获得了 1.1 W 高平均功率输出,相应的单脉冲能量高达 105 nJ,激光脉冲宽度为 9 ps,峰值功率为 11.6 kW。此时测得激光脉冲的中心波长为 1963 nm,3 dB 光谱带宽为 0.5 nm。

**关键词** 激光器;光纤激光器;光纤放大器;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/CJL201239.0802004

## 2 $\mu\text{m}$ Thulium-Doped Ultrafast All-Fiber Laser with Watts-Level Average Output Power

Liu Jiang Wang Pu

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

**Abstract** A high-power 2.0  $\mu\text{m}$  thulium-doped ultrafast all-fiber master oscillator power amplifier (MOPA) is developed. The seed source is a thulium-doped double-clad single-mode fiber laser passively mode-locked by a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM). It produces about 15 mW average output power with 10.4 MHz repetition rate. A thulium-doped all-fiber amplifier is used to boost average output power to 1.1 W, corresponding to the single pulse energy of 105 nJ. The pulse width is measured to be 9 ps, the center wavelength and the spectral bandwidth are 1963 nm and 0.5 nm respectively. To the best of our knowledge, this is the first report for all-fiber thulium-doped ultrafast fiber laser with watts-level average output power.

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

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

### 1 引 言

光纤激光器由于结构简单、稳定性高以及光束质量好等优点,在工业制造、科学研究、生物医疗等众多领域有着广泛的应用。过去几十年,1.0~1.5  $\mu\text{m}$  波段范围内的光纤激光器已被广泛地研究与应用。最近几年,2.0  $\mu\text{m}$  波段掺铥光纤(TDF)激

光器也受到了广泛关注。掺铥光纤有较宽的增益,可实现 1.7~2.1  $\mu\text{m}$  波段内的激光输出<sup>[1]</sup>,该波段内的激光可用于人眼安全雷达、激光传感与光谱分析以及特殊材料加工等。此外,2.0  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  波段内的激光输出<sup>[2~5]</sup>。2.0~5.0  $\mu\text{m}$

**收稿日期**: 2012-03-12; **收到修改稿日期**: 2012-04-23

**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、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)

波段内的激光在大气探测、激光医疗、激光雷达、光电对抗等应用领域极具重要地位,是近年来国内外新型激光源研究的热点之一。目前,2.0  $\mu\text{m}$ 波段掺铥连续光纤激光器的输出功率已达近千瓦量级<sup>[1]</sup>,掺铥单频光纤激光器的输出功率可到 600 W<sup>[6]</sup>,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<sup>[7]</sup>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 1.93  $\mu\text{m}$ ,平均输出功率为 3.4 mW,重复频率为 37 MHz,脉冲宽度为 1.32 ps。2009年,Wang等<sup>[8]</sup>利用半导体可饱和吸收镜(SESAM)作为可饱和吸收体、798 nm的多模半导体激光器作为抽运源、高掺杂双包层掺铥光纤作为激光增益介质实现了1.98  $\mu\text{m}$ 锁模激光脉冲输出。激光平均输出功率为 10 mW,重复频率为 13.2 MHz,相应的单脉冲能量为 0.76 nJ,脉冲宽度为 1.5 ps。2010年,Haxsen等<sup>[9]</sup>利用啁啾脉冲放大技术将平均功率为 124 mW、重复频率为 37.6 MHz的种子光放大到了 5.7 W,相应的单脉冲能量达到了 151 nJ,放大后的激光脉冲在腔外压缩到了 258 fs。但是该激光系统结构复杂、环境稳定性相对较差,从而限制了其在某些领域的广泛应用。最近,本课题组<sup>[10]</sup>也报道了半导体可饱和吸收镜被动锁模的 2.0  $\mu\text{m}$ 掺铥皮秒脉冲光纤激光器,以及氧化石墨烯被动锁模的 2.0  $\mu\text{m}$ 掺铥超短脉冲光纤激光器,其平均输出功率为 1.8 mW,相应的单脉冲能量为 0.56 nJ。

实验中,采用半导体可饱和吸收镜作为激光锁模器件,双包层单模掺铥光纤作为激光增益介质,实

现了 2  $\mu\text{m}$ 波段皮秒激光脉冲输出,最大平均功率为 15 mW。该种子光直接经过一级掺铥光纤放大器后,输出功率达到了 1.1 W,相应的最高单脉冲能量为 105 nJ,脉冲宽度为 9 ps。

## 2 实验装置

如图 1 所示,整个掺铥光纤激光器采用了主振荡功率放大(MOPA)结构设计。种子源主要包括光纤耦合输出的 790 nm 的多模半导体激光器、多模抽运合束器、光纤布拉格光栅(FBG)、掺铥双包层单模光纤、半导体可饱和吸收镜。整个线型激光腔的总长度大约为 10 m,其中包括大约 6 m 长的掺铥双包层单模光纤和 2 m 长的单模无源光纤。掺铥增益光纤的纤芯直径为 6.0  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.23,内包层直径为 125  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.45。该增益光纤在 790 nm 处包层抽运吸收率大约为 1.3 dB/m,其色散值大约为  $-0.47 \text{ ps}^2$ 。激光抽运源采用中心波长为 790 nm 的多模半导体激光器,其最大输出功率为 5 W,输出尾纤为(105/125) $\mu\text{m}$ 的双包层光纤,该光纤的数值孔径为 0.22。由于多模合束器损耗的存在,最后从合束器输出的功率大约为 4.5 W。抽运合束器的信号端熔接有高反射率的光纤布拉格光栅作为激光脉冲输出端,其中心波长为 1963 nm,反射率为 80%,3 dB 光谱带宽大约为 2 nm。而掺铥双包层光纤的另一端与反射式结构的半导体可饱和吸收镜直接耦合,半导体可饱和吸收镜来自 BATOP 公司,其调制深度大约为 18%,恢复时间为 500 fs。

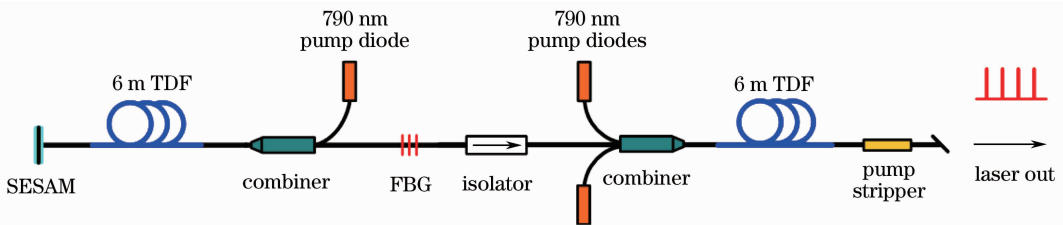


图 1 高功率全光纤结构掺铥超短脉冲光纤激光器实验装置图

Fig. 1 Schematic setup of high-power ultrafast thulium-doped all-fiber laser

掺铥光纤功率放大器主要包括最大承受功率为 300 mW 的隔离器、总输出功率为 10 W 的多模半导体激光器、(2+1) $\times$ 1 的抽运合束器、6 m 长的掺铥双包层单模光纤、抽运剥离器等。掺铥增益光纤的纤芯直径为 10.0  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.15,内包层直径为 130  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.46,该增益光纤在 790 nm 处包层抽运吸收率大约为 3 dB/m。另外,

为了保证激光稳定工作,光纤输出端面  $8^\circ$ 角切割,避免光纤端面的菲涅耳反射产生激光寄生振荡。

## 3 实验结果与分析

在抽运功率大约为 2.0 W 时,适当地调节半导体可饱和吸收镜与掺铥增益光纤之间的耦合,种子激光开始产生稳定的重复频率为 10.4 MHz 的自锁

模激光脉冲,其重复频率与激光器的腔长相吻合。图 2 为通过带宽 1 GHz 的示波器和 15 MHz 的光电探头测得的锁模激光脉冲串。当激光抽运功率在 1.5~2.0 W 之间时将出现调 Q 锁模状态。当抽运功率增加到 3.0 W 时,种子激光最大输出功率为 15 mW,相应的单脉冲能量为 1.4 nJ,中心波长为 1962.9 nm,3 dB 光谱带宽大约为 0.45 nm。进一步增加抽运功率种子激光将产生双脉冲或者三脉冲输出。为了实现最大的放大增益,我们保持种子激光以最大输出功率 15 mW 进入掺铥光纤放大级,由于 2.0 μm 偏振无关隔离器的插入损耗较大,种子光经过隔离器后进入掺铥光纤的功率只有 10 mW 左右。如图 3 所示,种子激光经过光纤放大器后,其平均输出功率与放大器的抽运功率几乎成线性增加。由于(2+1)×1 抽运合束器损耗以及光纤熔接损耗的存在,最后进入掺铥增益光纤的最大抽运功率大约为 8 W,此时放大器最大输出功率为 1.1 W,相应的单脉冲能量为 105 nJ,光-光转换效率大约为 14%,平均输出功率没能进一步提升只是受限于最大抽运功率的限制。

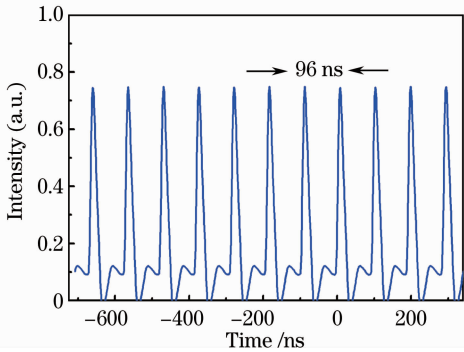


图 2 掺铥超短脉冲光纤激光器的脉冲串  
Fig. 2 Pulse train of ultrafast thulium-doped all-fiber laser

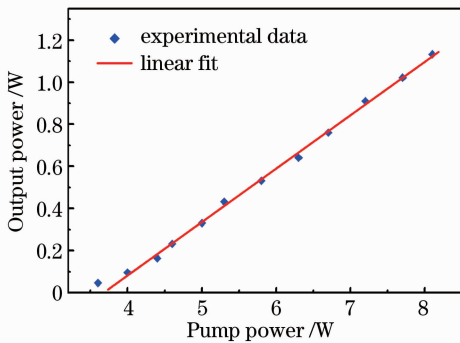


图 3 放大器平均输出功率随抽运功率的变化  
Fig. 3 Average output power versus pump power

如图 4 所示,此时采用分辨率为 0.05 nm 的光谱分析仪(YOKOGAWA AQ6375)测得放大后锁模激光脉冲的中心波长为 1963 nm,基本与种子激光的中心波长保持一致,而 3 dB 光谱带宽[半峰全宽(FWHM)]则变为 0.5 nm,略宽于种子激光的光谱带宽。此外,由于种子激光采用了光纤布拉格光栅来限制激光的中心波长,而掺铥增益光纤的增益带宽又较宽,因此在图 4 的光谱中可以看到较宽的超荧光光谱,但相对于锁模信号光而言还是比较低的。图 5 为放大器平均输出功率为 1.1 W 时的自相关信号,假设脉冲形状为双曲正割型,则锁模激光脉冲的宽度为 9 ps,脉冲的时间带宽积为 0.35,略接近于傅里叶变换极限 0.315。同时采用带宽为 7.5 GHz 的频谱分析仪测得锁模激光脉冲的信噪比大于 65 dB,表明锁模激光脉冲比较稳定。另外,也对整个掺铥光纤激光器的输出功率和光谱进行了长达 8 h 的监测,没有发现较明显的波动,从而也充分证明全光纤化 MOPA 结构的设计更利于激光器的长期稳定工作。

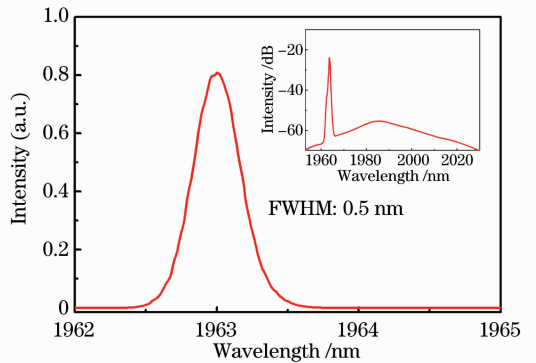


图 4 掺铥超短脉冲光纤激光器的输出光谱  
Fig. 4 Optical spectrum of ultrafast thulium-doped all-fiber laser

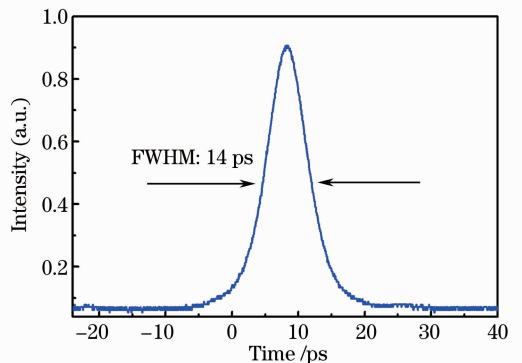


图 5 掺铥超短激光脉冲的自相关信号  
Fig. 5 Autocorrelation trace of ultrafast thulium-doped laser pulse

## 4 结 论

报道了高功率全光纤结构 2  $\mu\text{m}$  波段掺铥超短脉冲光纤激光器。整个光纤激光器采用了主振荡功率放大结构设计,平均功率为 10 mW、重复频率为 10.4 MHz 的皮秒脉冲种子光经过一级掺铥光纤放大器后,实现了 1.1 W 高平均功率输出,相应的单脉冲能量高达 105 nJ,脉冲宽度为 9 ps,峰值功率为 11.6 kW。该 2  $\mu\text{m}$  掺铥超短脉冲光纤激光器可作为抽运源抽运中红外高非线性氟化物、碲化物或硫化物等光纤产生 1.0~5.0  $\mu\text{m}$  波段的超连续谱光源。

## 参 考 文 献

- 1 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
  - 2 D. Buccoliero, H. Steffensen, O. Bang *et al.*. Thulium pumped high power supercontinuum in loss-determined optimum lengths of tellurite photonic crystal fiber[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(6): 061106
  - 3 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
  - 4 O. P. Kulkarni, V. V. Alexander, M. Kumar *et al.*. Supercontinuum generation from ~1.9 to 4.5  $\mu\text{m}$  in ZBLAN fiber with high average power generation beyond 3.8  $\mu\text{m}$  using a thulium-doped fiber amplifier[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2011, **28**(10): 2486~2498
  - 5 M. Eckerle, C. Kieleck, J. Świdorski *et al.*. Actively Q-switched and mode-locked Tm<sup>3+</sup>-doped silicate 2  $\mu\text{m}$  fiber laser for supercontinuum generation in fluoride fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(4): 512~514
  - 6 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
  - 7 M. A. Solodyankin, E. D. Obraztsova, A. S. Lobach *et al.*. Mode-locked 1.93  $\mu\text{m}$  thulium fiber laser with a carbon nanotube absorber[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(12): 1336~1338
  - 8 Q. Wang, J. Geng, T. Luo *et al.*. Mode-locked 2  $\mu\text{m}$  laser with highly thulium-doped silicate fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(23): 3616~3618
  - 9 F. Haxsen, D. Wandt, U. Morgner *et al.*. Pulse energy of 151 nJ from ultrafast thulium-doped chirped-pulse fiber amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(17): 2991~2993
  - 10 Liu Jiang, Xu Jia, Wang Qian *et al.*. High-pulse-energy passively mode-locked 2.0  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  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