

文章编号: 0258-7025(2008)03-0347-04

# 主动锁模飞秒光纤激光器

宋 方<sup>1</sup> 徐文成<sup>1</sup> 申民常<sup>1</sup> 刘颂豪<sup>1</sup> 王 可<sup>2</sup> 杨淑雯<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 华南师范大学信息光电子科技学院光子信息技术广东省重点实验室, 广东 广州 510006)  
<sup>2</sup> 深圳大学新技术研究中心, 广东 深圳 518060)

**摘要** 报道了主动锁模飞秒脉冲掺 Er<sup>3+</sup> 光纤激光器的实验结果。在光纤环形腔中通过引入粗波分复用器(CWDM)作为宽带滤波器, 实现了中心波长在 1550 nm, 重复频率为 2.5 GHz, 谱线 3 dB 带宽为 10.2 nm(对应的脉冲宽度为 247 fs)的激光脉冲输出。此时的抽运功率为 186 mW, 激光器输出平均功率为 1.3 mW, 从而获得了能够产生飞秒脉冲的高重复频率主动锁模掺 Er<sup>3+</sup> 光纤激光器。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 飞秒脉冲; 主动锁模; 调制

**中图分类号** TN 248.1      **文献标识码** A

## Actively Mode-Locked Femtosecond Pulse Fiber Laser

Song Fang<sup>1</sup> Xu Wencheng<sup>1</sup> Shen Minchang<sup>1</sup>  
Liu Songhao<sup>1</sup> Wang Ke<sup>2</sup> Yang Shuwen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Photonic Information Technology, School of Information Photoelectric Science and Technology, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China  
<sup>2</sup>Information Engineering School, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

**Abstract** An actively mode-locked femtosecond pulse fiber laser with coarse wavelength division multiplexing (CWDM) as the filter was successfully achieved. When the laser was pumped at 186 mW, the mode-locked pulses centered at 1550 nm with 10.2 nm bandwidth (corresponding to 247 fs pulse width) was obtained at the repetition rate of 2.5 GHz. The average output power of the laser was 1.3 mW.

**Key words** lasers; fiber laser; femtosecond pulse; actively mode-locked; modulate

## 1 引 言

窄脉宽、高重复频率的超短脉冲光源是未来发展高速率、大容量光纤通信系统的关键器件之一。主动锁模光纤激光器由于其具有高重复频率、波长可调谐、可输出变换极限光脉冲等优点, 使其可能成为未来高速率光纤通信系统中一种理想的光信号源<sup>[1,2]</sup>。对于主动锁模光纤激光器, 通常主要由调制器、增益介质及滤波器等器件构成。当调制频率为环形腔腔长所决定的基频的整数倍时, 光脉冲在环形腔内不断得到增强, 最终可以获得高重复频率

的窄脉冲输出。目前各国的研究人员在优化腔结构解决激光器稳定性的同时, 努力提高激光器的重复频率, 同时使输出的脉冲宽度更窄<sup>[3~10]</sup>。伴随着高速调制器技术的日益成熟, 目前激光器的重复频率可以达到 40 GHz 甚至更高。然而由于滤波器的带宽限制, 使激光频谱成分不可能很宽, 根据脉冲时间带宽积为常数的原则, 光脉冲宽度的进一步窄化受到一定的限制。目前主动锁模光纤激光器获得的脉冲宽度一般在皮秒量级。本文通过在光纤环形腔中引入粗波分复用器(CWDM)作为宽带滤波器, 在主动锁模条件下获得了光通信 C 波段(中心波长在

收稿日期: 2007-06-25; 收到修改稿日期: 2007-09-18

基金项目: 广东省自然科学基金(04010397)资助项目。

作者简介: 宋 方(1982—), 男, 河北人, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器、高码率光通信方面的研究。

E-mail: songfangdbv@sohu.com

导师简介: 徐文成(1965—), 男, 安徽人, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为光纤激光器及其在高码率光通信系统中的应用。E-mail: xuwch@scnu.edu.cn (通信作者)

1550 nm)飞秒量级的锁模脉冲输出。

## 2 实验装置及结果

根据输出脉冲的时间带宽积为一常数 ( $\Delta\tau \cdot \Delta\nu$  为常数),为了减小脉冲宽度,就必须增加锁模脉冲的频谱成分。实验中为了尽量不受滤波器带宽限制的影响,同时又能使中心波长在1550 nm范围,选用一个  $1 \times 4$  的粗波分复用器(中心波长分别为1510 nm,1530 nm,1550 nm,1570 nm,通道间隔为20 nm)作为滤波器,其中各中心波长范围内的3 dB带宽均为10 nm左右,实验中选用1550 nm输出端,图1为主动锁模掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤激光器的结构图。其中抽运源为980 nm半导体激光器,其最大输出光功率为200 mW。抽运光经由一个980 nm/1550 nm波分复用器(WDM)耦合到环形腔中。实验采用高掺杂的  $\text{Er}^{3+}$  光纤作为增益介质,吸收系数为12.5 dB/m,数值孔径为0.22。光隔离器(ISO)保证光在环形腔激光器中的单向传输。输出耦合器(output coupler)的耦合比为90:10,其中90%的光在腔内反复循环形成振荡,10%端为输出端。在输出端分别采用光谱分析仪、光示波器、功率计对输出脉冲进行测量。锁模的关键器件为  $\text{LiNbO}_3$  强度调制器( $\text{LiNbO}_3$  modulator:工作波长在1550 nm波段,插入损耗小于6 dB,消光比大于20 dB,比特率10 Gbit/s,3 dB调制带宽15 GHz,半波电压4 V),由于其对偏振敏感,故在入射端插入一个偏振控制器(PC),用于调节光的偏振态,保证其达到最好的调制效果。调制器的射频(RF)信号源由微波信号发生器提供,其射频信号的最大重复频率可为20 GHz。对于主动锁模光纤激光器,由于其处于谐波锁模状态,所以只有当调制频率与腔长严格匹配时,才能满足锁模条件,即调制频率  $f_m = nf_c$  ( $f_c$  为

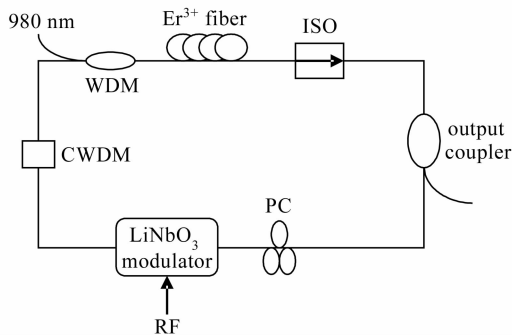


图1 主动锁模掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤激光器实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of the actively  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber laser

环形腔的基频,  $f_c = c/(n \times L)$ ,  $n$  为折射率,  $L$  为腔长)。此时,主动锁模光纤激光器内的脉冲才能每次经过调制器时都能获得最大的透射率,从而不断被压窄形成锁模光脉冲。实验中测得其腔长为16 m,腔的基频为12.2 MHz。

实验中逐渐增加980 nm激光器的抽运功率,并调整射频信号的输入频率,当调制器的频率与环形腔的基频不完全匹配时,其光示波器和光谱分析仪的结果如图2(a)和(b)所示。图2中可以清楚地看出此时的输出脉冲不稳定,脉冲轮廓十分模糊,幅度抖动剧烈,时间抖动明显,其光谱3 dB线宽很窄,只有0.8 nm左右。同时调整偏振控制器,发现此时的光谱中心波长发生漂移,甚至出现双波长输出。可以断定此时的激光器还没有完全进入锁模工作状态。进一步调整调制器的频率,可以看到当调制频率和腔的基频十分吻合时,从频谱可观察到明显的锁模迹象,谱线突然展宽,同时示波器中的脉冲序列也突然变得稳定而且轮廓清晰,时间抖动很小,如图3(a)和(b)所示。判定此时的激光器已经完全处于锁模工作状态,并测定激光器的阈值抽运功率为42 mW。

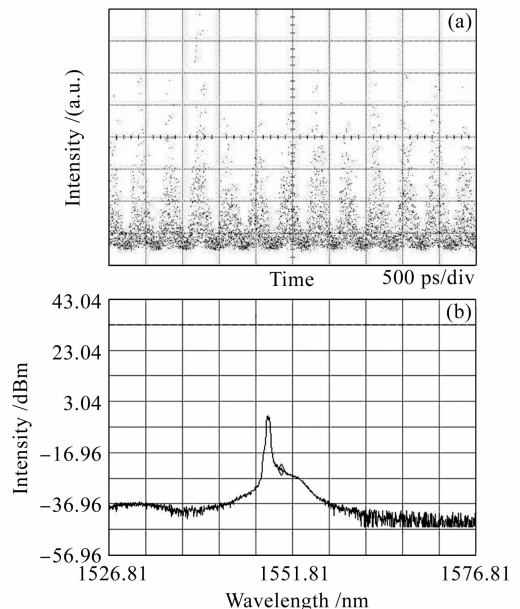


图2 调制频率与基频不匹配时激光器脉冲序列(a)和输出光谱(b)

Fig. 2 Pulse train (a) and output spectrum of the laser (b) when the modulation frequency does not match with the basic frequency

考虑到锁模的关键器件为  $\text{LiNbO}_3$  强度调制器,同时它又是偏振敏感器件,因此腔内光偏振态的变化对激光器的锁模脉冲质量有不可忽略的影响。

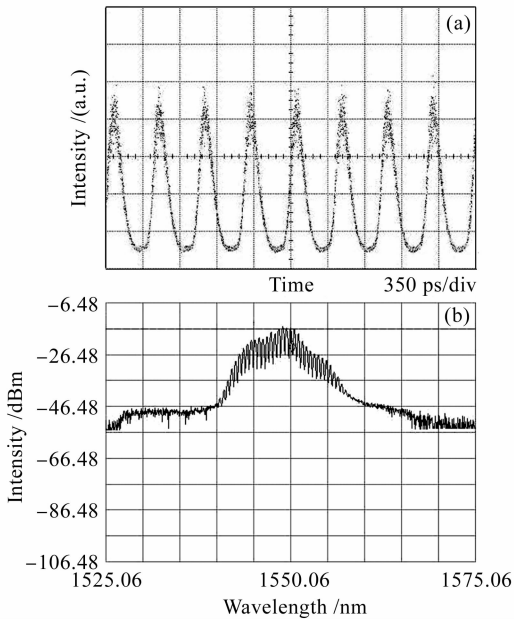


图 3 调制频率与基频相匹配时激光器脉冲序列(a)和输出光谱(b)  
 Fig. 3 Pulse train (a) and output spectrum of the laser (b) when the modulation frequency matches with the basic frequency

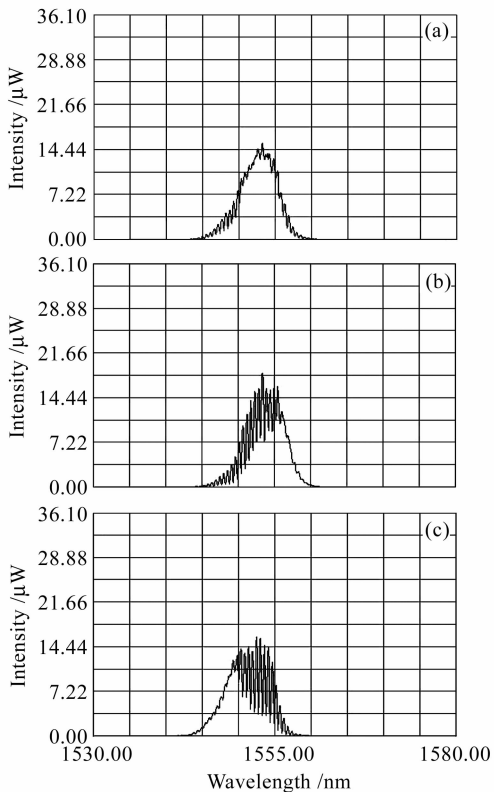


图 4 LiNbO<sub>3</sub> 调制器偏振敏感对激光器输出光谱的影响  
 Fig. 4 Influence of LiNbO<sub>3</sub> modulator's polarization sensitivity on the output spectra

实验中在保持调制器频率不变的情况下,调整偏振控制器发现输出锁模脉冲有明显变化。图 4 为调节偏振控制器时线性坐标下的频谱图,其中图 4(a)的频谱比较均匀,谱线轮廓较为清晰,此时旋转偏振控制器,致使部分频谱成分的偏振态与 LiNbO<sub>3</sub> 强度调制器失谐,从而影响锁模,如图 4(b)和(c)所示,可发现频谱明显变化。

鉴于主动锁模光纤激光器的稳定性容易受腔长、外界环境等诸多因素的影响,通过多次反复实验,在调制频率和偏振控制器均处于最佳状态的情况下,最终获得了较为理想的实验结果。用光谱分析仪和示波器分别测得的锁模光信号的频谱和脉冲序列如图 5(a)和(b)所示,可以看出光谱中心波长为 1549.7 nm,谱线 3 dB 宽度为 10.2 nm,谱线整体形状较好。根据 sech 脉冲近似以及傅里叶变换极限估计,其脉冲宽度的理论极限值约为 247 fs<sup>[11]</sup>。另外示波器上呈现出了稳定的脉冲序列,其重复频率为 2.502 GHz,此时的抽运功率为 186 mW,输出锁模脉冲的平均功率为 1.3 mW。

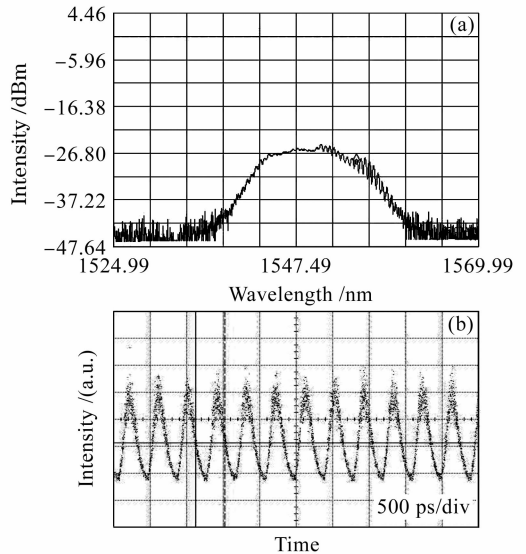


图 5 主动锁模光纤激光器输出光谱(a)和脉冲序列(b)  
 Fig. 5 Output spectrum (a) and pulse train (b) of the actively mode-locked fiber laser

### 3 结 论

通过在主动锁模掺 Er<sup>3+</sup> 光纤激光器中利用宽带滤波器,实验上获得了中心波长在 1550 nm,谱线宽度为 10.2 nm,重复频率为 2.502 GHz 的锁模脉冲输出,谱线宽度明显展宽。根据时间带宽积公式,得出脉冲宽度为 247 fs,证实了在主动锁模光纤激光器中可以通过引入具有较大带宽的滤波器来获得飞

秒脉冲的输出。如果在实验中继续考虑激光器的稳定性,引入腔体稳定机制,同时继续提高调制器的信号重复频率,将会大大提高该激光器的性能。同时实验中还发现  $\text{LiNbO}_3$  调制器的性能对锁模状态会产生较大的影响,需要引入性能更加稳定的调制器作为锁模器件。总之,飞秒脉冲高重复频率的主动锁模掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤激光器将会在光通信、光传感等诸多领域有着广泛的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 M. Tang, X. L. Tian, P. Shum *et al.*. Four-wave mixing assisted self-stable  $4 \times 10$  GHz actively mode-locked erbium fiber ring laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(5):1726~1730
- 2 Jennifer J. O'Neil, J. Nathan Kutz, Björn Sandstede. Theory and simulation of the dynamics and stability of actively mode locked lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(10): 1412~1419
- 3 Lixin Xu, L. F. K. Lui, P. K. A. Wai *et al.*. 10 GHz actively mode-locked erbium-doped fiber ring laser using an electro-absorption modulator and a linear optical amplifier [C]. *OFC*, 2006, OWI27
- 4 K. Abedin, F. Kubota. Supercontinuum generation with mode-spacing of 154 GHz in 1460~1680 nm region from optical fiber by using actively mode-locked fiber laser [C]. *OFC*, 2003, TuL1
- 5 Li Yanan, Yu Jinlong, Wang Jian *et al.*. A novel scheme for the cavity length stability of actively mode-locked fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8):897~900  
李亚男,于晋龙,王 剑 等. 一种新型主动锁模光纤激光器腔长稳定技术研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(8):897~900
- 6 Dai Kehui, Zhang Xinliang, Xu Fan *et al.*. Actively mode-locked fiber ring laser based on cross-gain modulation effect of semiconductor optical amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3):293~297  
戴科辉,张新亮,徐 帆 等. 基于半导体光放大器交叉增益调制效应的主动锁模光纤激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 293~297
- 7 Lü Jie, Yu Jinlong, Li Yanan *et al.*. 40Gb/s all-optical clock extraction based on the injection mode-locked laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10):1307~1312  
吕 捷,于晋龙,李亚男 等. 基于注入锁模激光器的 40 Gb/s 全光时钟提取[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10):1307~1312
- 8 Yu Benli, Zhen Shenglai, Zhu Jun *et al.*. Experimental study on low-noise fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 217~220  
俞本立,甄胜来,朱 军 等. 低噪声光纤激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2):217~220
- 9 Song Fang, Xu Wencheng, Chen Weicheng *et al.*. 78 fs passively mode-locked  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber ring laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9):1174~1177  
宋 方,徐文成,陈伟成 等. 78 fs 被动锁模掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(9):1174~1177
- 10 Shen Minchang, Xu Wencheng, Chen Weicheng *et al.*. Experimental study of fiber ring laser with single polarization controller [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11):2003~2007  
申民常,徐文成,陈伟成 等. 单偏振控制器环形腔光纤激光器实验研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10):2003~2007
- 11 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 415~416  
Govind P. Agrawal. *非线性光纤光学原理及应用*[M]. 贾东方,余震虹 译. 北京:电子工业出版社, 2002. 415~416