

# 全正色散被动锁模掺镱全光纤环形激光器

张文启,葛廷武,于峰,代京京,王璞,王智勇  
(北京工业大学,北京 100124)

**摘要:**采用 976 nm 半导体激光器为泵浦源,高掺杂  $\text{Yb}^{3+}$  光纤为增益介质,利用非线性偏转效应实现被动锁模。得到了中心波长为 1046 nm,光谱宽度为 24 nm,脉冲宽度为 54 ps,平均输出功率为 93 mW 的超短脉冲。通过缩短腔长,获得了较高的重复频率,达到 41 MHz。

**关键词:**光纤激光器;被动锁模;非线性偏振旋转;环形腔

**中图分类号:**TN248.4 **文献标识码:**A

## Passively mode-locked $\text{Yb}^{3+}$ -doped all-fiber structure fiber ring laser with positive dispersion cavity

ZHANG Wen-qi, GE Ting-wu, YU Feng, DAI Jing-jing, WANG Pu, WANG Zhi-yong  
(Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** 976 nm LD pumped laser is used as the pump source and high concentration  $\text{Yb}^{3+}$ -doped fiber is adopted as gain medium. Using the nonlinear polarization rotation (NPR) effect of the fiber, mode-locked pulse is obtained. The center wavelength of the mode-locked pulse is 1046 nm with 3 dB bandwidth of 24 nm. The pulse duration is 54 ps and the average power is 93 mW. In order to achieve a high fundamental repetition rate, we use a shorter cavity. The fundamental repetition rate reaches 41 MHz.

**Key words:** fiber laser; passively mode-locked; nonlinear polarization rotation; ring cavity

### 1 引言

利用掺稀土光纤锁模激光器获得超短脉冲,在光纤通信、超快光学、光纤传感、工业加工、光信息处理、激光制导、医疗、惯性约束快点火、全色显示和激光印刷等领域都有重要应用,近年来引起人们的广泛关注,并已在  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  等掺杂光纤中获得了锁模光脉冲输出<sup>[1-4]</sup>。由于  $\text{Yb}^{3+}$  具有很宽的吸收谱和发射谱,可以采用不同波长的泵浦光源,在 970 ~ 1200 nm 波长范围内得到激光输出,并可进行宽带调谐。同时,它不存在激发态吸收、浓度淬灭和多声子跃迁等激发过程,能获得高的量子转化效率,其增益带宽可支持小于 30 fs 的变换极限脉冲<sup>[5]</sup>。国内外一些学者对基于非线性偏振旋转效应实现被动锁模的掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤激光器进行了研究。

电子科技大学的黄绣江等,利用光纤的非线性偏振旋转效应,得到自启动、十分稳定的皮秒量级锁

模光脉冲,输出功率 25 mW,中心波长 1056 nm,3 dB带宽 11.7 nm,重复频率 20 MHz<sup>[6]</sup>。天津大学甘雨等,报道了基于偏振旋转技术等快可饱和吸收体的被动调 Q 锁模光纤激光器,通过调节抽运光功率和偏振控制器的角度得到了调 Q,调 Q 锁模与锁模三种状态稳定的输出脉冲。获得的锁模脉冲中心波长为 1.05  $\mu\text{m}$ ,重复频率为 20 MHz,脉冲光谱宽度为 13.8 nm,抽运功率为 270 mW 时,锁模平均输出功率为 15.82 mW<sup>[7]</sup>。太原理工大学杨玲珍等,利用非线性偏振旋转锁模技术,在掺杂光纤长度为 1.6 m 时,获得了波长为 1053 nm、最大输出功率为 9.5 mW、

**基金项目:**教育部新世纪优秀人才支持计划(No. NCET - 09 - 0002)资助。

**作者简介:**张文启(1982 - ),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器方向的研究。E-mail: zhangwenqi@emails.bjtu.edu.cn

**收稿日期:**2010-09-27

光谱宽度为 6 nm、重复频率为 23.7 MHz 的超短光脉冲输出<sup>[8]</sup>。天津大学任芳等,报道了  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺双包层光纤作为增益介质的全光纤环形腔激光器。实现了被动调  $Q$ , 调  $Q$  锁模和连续锁模的运转状态,其中调  $Q$  重复频率 7.583 ~ 32.86 kHz,连续锁模重复频率为 8.843 MHz<sup>[9]</sup>。

基于非线性偏振旋转被动锁模掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤激光器,获得高重复频率基阶锁模的研究,国内鲜有报道,已报道的实验,重复频率较低,小于 30 MHz,输出功率也有限。我们通过采用高掺杂增益光纤,减小器件尾纤长度,获得了采用三环偏振控制器实现非线性偏振旋转锁模的最高重频 41 MHz 与最大功率 93 mW 的 54 ps 的超短脉冲激光输出。

## 2 实验装置及原理

基于非线性偏振旋转效应被动锁模掺镱全光纤环形腔激光器实验装置如图 1 所示。激光器腔体主要有偏振相关隔离器 (ISO), 偏振控制器 (PC1, PC2), 976/1060 nm 波分复用器 (WDM), 高浓度掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤, 30/70 耦合输出器 (Output coupler) 组成。实验中,泵浦源最高输出功率为 556 mW (这是泵浦源显示功率,实际功率比显示低 10% 左右),最大输出功率下,室温工作中心波长为 975.6 nm;偏振相关隔离器透射谱 3 dB 谱宽为  $1060 \pm 20$  nm;耦合器 30% 一端作为输出端;高掺杂  $\text{Yb}^{3+}$  光纤的长度为 1.1 m, 977 nm 吸收率为 300 dB/m。整个环形腔均采用全光纤器件,各器件之间使用光纤熔接机焊接实现连接。在输出端接有 99:1 的光纤耦合器,99% 端作为输出,1% 端连接 50:50 的光纤耦合器。50:50 光纤耦合器两输出端口用于接各种测量仪器。使用连接有 InGaAs 快速光电探测器的数字示波器 (Tektronix TDS2024B) 观测输出激光的时域特性,使用多功能光谱分析仪 (ANDO AQ6317B) 观测激光的频谱特性,功率计 (OPHIR 0 ~ 3 W) 测量激光输出功率,自相关仪 (FR-103WS) 测量输出脉冲的脉冲宽度。

其工作原理是:偏振相关隔离器中的偏振器将任意偏振态入射的连续激光转变成线偏振态,偏振控制器 PC2 将线偏振激光变成椭圆偏振光。该椭圆偏振光可以认为是两个相互垂直的、具有不同强度的线偏振光的合成。椭圆偏振的激光在随后的掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤及腔内单模光纤传输时,由于非线性效应 (自相位调制与交叉相位调制),使得两个互相垂直的偏振分量经过相同长度的光纤所产生的非线性相移不同,从而使椭圆偏振光的偏振状态发生改变。

通过调节偏振控制器 PC1 调节激光的偏振态,使得强度大的激光成分低损耗地通过偏振相关隔离器中的偏振器,而强度小的激光成分因与偏振相关隔离器的主偏振方向不一致而被滤除。激光脉冲再多次经历上述的整形过程,最终输出锁模激光脉冲。整个过程类似于被动锁模的饱和吸收体的作用过程<sup>[10]</sup>。

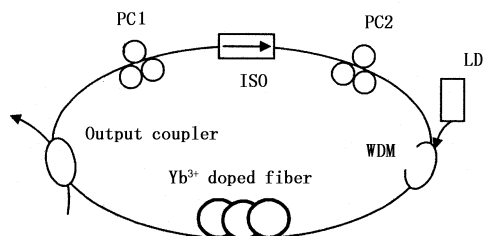


图 1 被动锁模掺镱全光纤环形腔激光器实验装置

Fig.1 experimental setup of passively mode-locked  $\text{Yb}^{3+}$ -doped all-fiber structure fiber ring laser

## 3 实验结果及分析

实验中,通过改变泵浦功率,并调节偏振控制器 PC1 和 PC2,分别获得了非常稳定的调  $Q$  锁模脉冲输出和连续锁模脉冲输出。利用示波器观察了其锁模脉冲波形情况,如图 2 所示。同时发现,无论是在调  $Q$  锁模状态还是在连续锁模状态下,改变 PC1 和 PC2 都可以实现波长的可调谐。泵浦功率大于 33 mW 后,可以有稳定的连续锁模脉冲输出,此时输出功率为 2.803 mW。泵浦功率为 556.91 mW 时,输出功率达到 93.118 mW。泵浦源实际输出功率比泵浦源显示功率低 10% 左右,又由于泵浦光进入 WDM 时有熔接损耗,WDM 与掺杂光纤熔接时也有熔接损耗,每个熔点约有 0.05 dB 的损耗,所进入掺杂光纤的实际泵浦功率比泵浦源显示功率低。此激光腔的光光转换效率可以达到 62%。

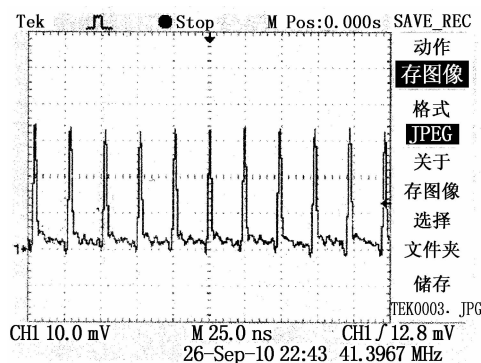


图 2 连续锁模脉冲序列

Fig.2 CW mode-locking pulse train

实验中,得到连续锁模脉冲输出,脉冲周期和幅度都十分均匀,并且非常稳定,其重复频率为 41.39 MHz。根据锁模原理中腔长与频率的关系

$f=c/nL$ ,可以得到,其腔长为4.9 m时,对应的锁模重复频率为41.39 MHz,这与实际相符,同时说明激光器工作在基阶锁模状态。由于激光器重复频率与腔长成反比,因此要提高光纤激光器重复频率就要缩短激光器腔长。短腔中由于单位时间腔内脉冲数目增加,单个脉冲能量减少,可能会造成腔内非线性效应不足,导致锁模出现困难。又由于器件之间连接都需要有一些尾纤(熔接机进行光纤熔接时,器件尾纤不能太短),掺杂光纤本身也有一定长度,所以激光腔的腔长不能太短。在本次实验中,各器件的尾纤都已经很短,在较短腔长的情况下获得了较高的重复频率。通过对比,实验中发现,随着腔长的不断缩短,锁模变得越来越困难,输出脉冲也变得越来越不稳定。如果想使重复频率进一步提高,单单通过缩短腔长,提高重复频率,空间已经不是太大,可以通过高次谐波锁模的方法进一步提高重复频率<sup>[11]</sup>。

利用光谱仪观察了其锁模光谱,如图3所示,光谱3 dB带宽为24.094 nm,中心波长为1046.078 nm。光谱非常光滑,没有出现频谱边带<sup>[12]</sup>。经自相关仪测量,脉冲宽度为54 ps。可以得到时间带宽积为356.8,说明激光器腔内存在很大的色散和啁啾效应,脉宽出现展宽。这是因为激光腔内光纤都是正色散光纤,而掺Yb<sup>3+</sup>光纤所产生的锁模脉冲通常为一个啁啾脉冲,偏离傅里叶变换极限。实验为了获得皮秒量级的高脉冲能量,在后续实验中要加入放大级,所以没有进行色散补偿。

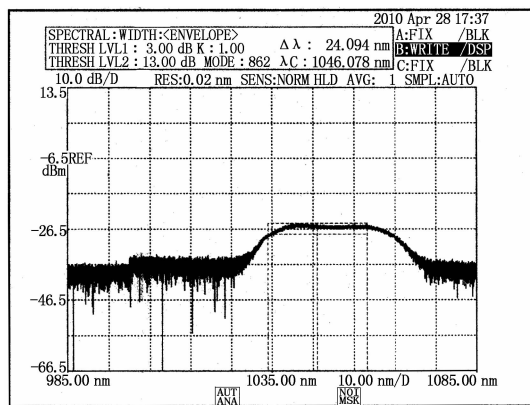


图3 锁模光谱图

Fig. 3 CW mode-locking spectrum

在室温环境下,测试了其工作稳定性,经过连续4 h观测,其脉冲幅度几乎没有浮动,功率计监测其功率,0.1 mW量级没有变化,脉冲形状、重复频率、中心波长,光谱谱宽均没有变化。关闭电源,间隔24 h后,重新打开电源,调节至原有泵浦功率,脉冲

形状、重复频率、中心波长,光谱谱宽未变化,脉冲幅度几乎没有浮动,输出功率0.1 mW量级没有变化。

#### 4 结 论

通过采用高掺杂Yb<sup>3+</sup>光纤,尽量使用较短的尾纤,缩短了腔长,获得了41 MHz较高的重复频率。工作状态非常稳定,得到了中心波长为1046 nm,光谱宽度为24 nm,脉冲宽度为54 ps,平均输出功率为93 mW的超短脉冲。通过腔外压缩,或者腔内色散补偿,可以获得更窄的超短脉冲。为了获得皮秒量级,更高能量的脉冲,没有对激光器进行色散补偿,在后续实验中,计划加入光纤放大器,对脉冲进行放大。

#### 参考文献:

- [1] Yang Lingzhen, Chen Guofu, Wang Yishan, et al. Experimental study of ultrashort pulse Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser [J]. Chinese J. Lasers, 2005, 32(2): 153 - 155. (in Chinese)  
杨玲珍, 陈国夫, 王屹山, 等. 超短脉冲掺Yb<sup>3+</sup>光纤激光器实验研究[J]. 中国激光, 2005, 32(2): 153 - 155.
- [2] Zhong Yihui, Zhang Zuxing, Tao Xiangyang. Research progress of passively mode-locked fiber laser [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2008, 45(8): 46 - 51. (in Chinese)  
钟义晖, 张祖兴, 陶向阳. 被动锁模光纤激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(8): 46 - 51.
- [3] Song Fang, Xu Wencheng, Chen Weicheng, et al. 78 fs passively mode-locked Er<sup>3+</sup>-doped fiber ring laser [J]. Chinese J. Lasers, 2007, 34(9): 1174 - 1177. (in Chinese)  
宋方, 徐文成, 陈伟成, 等. 78 fs 被动锁模掺Er<sup>3+</sup>光纤激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(9): 1174 - 1177.
- [4] Zhou Xiaofang, Xiang Wanghua, Gan Yu, et al. Experimental study of Yb<sup>3+</sup>-doped fiber ring cavity mode-locked lasers [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2006, 17(10): 1201 - 1204. (in Chinese)  
周晓芳, 向望华, 甘雨, 等. 掺Yb<sup>3+</sup>光纤环形腔锁模激光器的实验研究[J]. 光电子·激光, 2006, 17(10): 1201 - 1204.
- [5] L Lefort, J H V Price, D J Richardson, et al. Practical low-noise stretched-pulse Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser [J]. Opt. Lett., 2002, 27(5): 291 - 293.
- [6] Huang Xiujiang, Liu Yongzhi, Sui Zhan, et al. Ultrashort pulse Yb<sup>3+</sup>-doped fiber ring laser with all-fiber structure [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(3): 1191 - 1195. (in Chinese)  
黄绣江, 刘永智, 隋展, 等. 全光纤超短脉冲掺Yb<sup>3+</sup>光纤环形激光器[J]. 物理学报, 2006, 55(3):

- 1191 – 1195.
- [7] Gan Yu, Xiang Wanghua, Zhou Xiaofang, et al. Passive  $Q$ -switching and mode-locking  $\text{Yb}^{3+}$ -doped fiber laser[J]. Chinese J. Lasers, 2006, 33(8): 1021 – 1024. (in Chinese)
- 甘雨, 向望华, 周晓芳, 等. 被动调  $Q$  锁模掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2006, 33(8): 1021 – 1024.
- [8] Yang Lingzhen, Wang Yuncai, Chen Guofu, et al. Generation of ultra short pulse at 1053 nm from fiber laser[J]. Laser Technology, 2007, 31(6): 610 – 612. (in Chinese)
- 杨玲珍, 王云才, 陈国夫, 等. 1053 nm 超短脉冲光纤激光的产生[J]. 激光技术, 2007, 31(6): 610 – 612.
- [9] Ren Fang, Xiang Wanghua, Zu Peng, et al. Experimental study on Er/Yb Co-doped double-clad all fiber laser[J]. Chinese J. Lasers, 2010, 37(3): 622 – 626. (in Chinese)
- 任芳, 向望华, 祖鹏, 等. Er/Yb 共掺双包层全光纤激光器的实验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 622 – 626.
- [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. (in Chinese)
- 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(11): 2003 – 2007.
- [11] Lin Honghuan, Sui Zhan, Wang Jianjun, et al. Passive harmonically mode-locked  $\text{Yb}^{3+}$ -doped fiber ring laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(11): 1813 – 1817. (in Chinese)
- 林宏奂, 隋展, 王建军, 等. 被动锁模掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤环形激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(11): 1813 – 1817.
- [12] Ye Hui, Xu Wencheng, Luo Zhichao, et al. Measurement of dispersion of an optical fiber in ring cavity using the sideband spectrum method[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(7): 1323 – 1326. (in Chinese)
- 叶辉, 徐文成, 罗智超, 等. 利用光纤激光器边带效应测量光谱色散 [J]. 光学学报, 2008, 28(7): 1323 – 1326.