

# 锁模脉冲波长连续可调谐光纤激光器\*

李喆<sup>1,2</sup>, 赵卫<sup>1</sup>, 张伟<sup>1,2</sup>, 陈国夫<sup>1</sup>, 王屹山<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:**利用在腔内加入可调谐光纤光栅滤波器使“8”字形腔掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器在锁模状态下实现波长连续可调谐. 实验中, 在保证锁模状态稳定的情况下, 通过调节可调谐光纤光栅滤波器, 使激光器输出锁模脉冲的中心波长在 1 047 nm~1 055 nm 范围内连续调谐, 重复频率稳定维持在 4.9 MHz. 在中心波长 1 053 nm 处, 测得锁模脉冲输出平均功率为 8.02 mW, 光谱带宽 1 nm, 脉冲宽度为 259.3 ps. 这种“8”字形腔被动锁模光纤激光器在锁模状态下对波长连续可调谐, 并可长时间稳定工作.

**关键词:**波长连续调谐; 锁模脉冲; 光纤光栅滤波器; “8”字形腔; 光纤激光器; 掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤

**中图分类号:** TN248.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2009)01-0001-4

## 0 引言

近年来, 可调谐短脉冲光源在高速波分复用/光时分复用(WDM/OTDM)通信系统中起着越来越重要的作用<sup>[1]</sup>. 采用半导体激光器泵浦的超短脉冲光纤激光器相对于常规激光系统在散热、稳定性、光束质量、转化效率、体积及与现有系统兼容、调节等方面具有显著优势, 成为研究的热点<sup>[2-5]</sup>. 掺 Yb<sup>3+</sup> 石英光纤具有较宽的吸收谱和发射谱, 较高的功率饱和因子, 较高的光-光转换效率, 且不存在浓度淬灭现象, 可以进行高掺杂以提高增益, 同时具有很大的增益带宽可支持小于 30fs 的变换极限脉冲<sup>[6]</sup>, 因而在大功率、高能量超短脉冲光纤激光器的增益介质中备受青睐.

目前已提出很多波长稳定调谐的方案, 包括采用法珀里-泊罗标准具(F-P)、声光滤波器、M-Z 干涉仪、标准具滤波器、光纤光栅(FBG)等波长调谐器件<sup>[7-9]</sup>. 由于光纤光栅与光纤之间天然的兼容性, 可实现全光纤型可调谐激光器, 且运用 FBG 作为调谐元件具有良好的调谐速度和窄线宽, 中心波长可定制, 具有良好的调谐稳定性和性价比, 所以采用光纤光栅调谐的方案尤其具吸引力. 2000 年, 关柏欧、郭转运等人利用经过特殊处理的高温灵敏度光纤光栅作调谐元件, 采用温度调谐方法对掺 Er<sup>3+</sup> 光纤环形激光器实现了 38nm 的激光波长调谐<sup>[9]</sup>; 2001 年, H. L. Jin 等人报道了通过调节串接的长周期光纤光栅(Cascaded LPFG)的应力实现多波长可调谐的光

纤激光器<sup>[10]</sup>; 2005 年, 黄绣江、刘永智等人利用腔内偏振控制器(PC)在掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤环型腔激光器中实现连续可调谐激光输出, 得到 20 nm 的调谐范围<sup>[11]</sup>. 但他们都是对连续波激光的波长调谐, 而未对激光器锁模脉冲的波长连续调谐进行研究. 本文通过在腔内加入可调谐光纤光栅滤波器, 调节可调谐光纤光栅滤波器控制通过此滤波器的光波波段, 从而实现了对激光器输出锁模脉冲的波长连续可调谐. 在实验中观察到激光器输出的锁模脉冲中心波长在 1 047 nm~1 055 nm 范围内连续调谐, 重复频率 4.9 MHz, 平均输出功率在较小范围内变化, 锁模过程可以完全自启动, 锁模状态一直很稳定. 当锁模的中心波长位于 1 053 nm 处时, 测得输出功率为 8.02 mW, 光谱带宽 1 nm, 脉冲宽度(FWHM)为 259.3 ps. 这种“8”字形腔被动锁模光纤激光器在锁模状态下实现对波长的连续可调谐, 并可以长时间稳定工作, 可作为高能量中心波长可调谐锁模光纤激光系统的种子源.

## 1 实验装置及原理

实验装置如图 1. 从 LD 泵浦源(光纤输出, 最大输出功率为 500 mW)输出光经端口 1 由 980/1 053 WDM 耦合进入光纤激光腔. 左环路主要提供光学回路及增益的作用, 腔内增益光纤为长度 0.90 m 的单模掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤(芯径 6.2 μm). 泵浦光进入光纤激光腔首先经过增益光纤辐射出荧光, 即信号光. 信号光经过 O/E LAND 的手动可调谐光纤光栅滤波器 FBG(Manual Tunable Fiber Bragg Grating, 中心波长: 1 053 nm, 带宽: 15 nm, 调谐范围: 1 040~1 060 nm, 插入损耗: 0.2 dB), 由于光纤光栅滤波器

\* 国家自然科学基金(60537060)资助

Tel: 029-88887603 Email: lij710072@yahoo.com.cn

收稿日期: 2007-04-23

有滤波和选择波长的作用,可以控制不同波段的信号光进入右侧的非线性光学环形镜(NOLM, Nonlinear Optical Loop Mirror). 非线性光纤环形镜由一分光比为 53 : 47 的  $2 \times 2$  端口的偏振无关光纤耦合器 coupler<sub>1</sub> 和 20 m 的普通石英光纤(Lucent 980 coupler fiber, 数值孔径 0.16, 模场直径  $5 \mu\text{m}$ ) 组成, coupler<sub>1</sub> 使得非线性光纤环形镜中相对传播的两束光有不同的强度, 在光纤中产生了非线性相对相移. 在左侧光纤环中加入了一个中心波长为 1 053 nm 并带尾纤的光隔离器(Isolator). PC<sub>1</sub>、PC<sub>2</sub> 为光纤偏振控制器, 联合使用促使 NOLM 进行彻底干涉锁模, 输出稳定的锁模激光. 本实验采用了分光比为 5 : 95 的光纤耦合器 coupler<sub>2</sub>, 并在分光比占 5% 的端口 2 耦合输出.

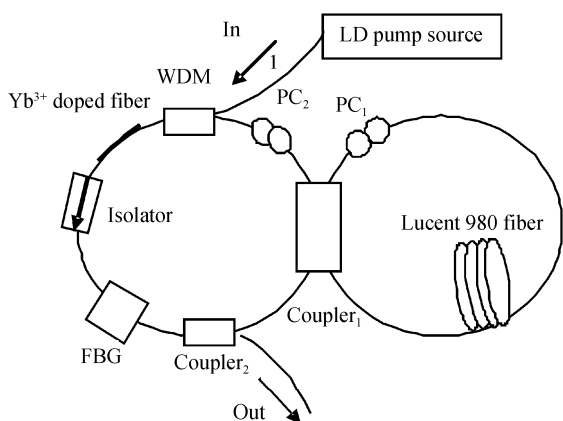


图1 实验装置结构

Fig.1 The schematic of the experiment equipment

“8”字形腔锁模掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤激光器的锁模机制是非线性光纤环形镜锁模, 是一种强度干涉锁模. 实验中的 NOLM 型“8”字形腔锁模脉冲掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤激光器就是基于此锁模机理. 输入光经过一个非 3dB 耦合器, 被分成沿相反方向传输、不同强度的两束光. 反向传输的两束光由光纤中自相位调制 (SPM)、交叉相位调制 (XPM) 等非线性效应引起不同的非线性相移. 这两束光在非 3 dB 耦合器中相干干涉, 透过脉冲中央的高强度部分, 而阻挡低强度脉冲的边翼, 使得脉冲在腔内往返一次后就有微小的窄化. 此脉冲在“8”字形激光腔内往复运转, 当脉冲宽度窄到再次通过 NOLM 已经无法再被窄化时, 脉冲激光将通过光纤输出耦合器输出. “8”字形腔有以下优点: “8”字形腔利用非线性光纤环形镜中的两束相反方向传播的光在耦合器中的相干叠加来完成锁模, 不直接依赖于光的偏振性, 所以具有较高的环境稳定性; 另外, 由于非线性光纤环形镜自身的特性造成了“8”字形腔光纤激光器的输出有更低的背景噪音, 输出脉冲光谱更光滑、更干净.

光纤布喇格光栅 (FBG) 是一种光纤折射率受到

周期调制的光纤器件. 布喇格反射条件由 FBG 方程表示:  $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ . 其中,  $\lambda_B$  为无应变时 FBG 的布喇格波长;  $\Lambda$  为光栅周期;  $n_{\text{eff}}$  为光纤纤芯的有效折射率. 当 FBG 轴向受应力作用或温度的变化影响时,  $n_{\text{eff}}$  和  $\Lambda$  都会发生变化, 使得反射、透射波段都发生偏移. 实验采用的可调谐光纤光栅滤波器就是通过施加拉伸应力改变光纤光栅的有效折射率而改变它的透射波长. 在腔内的光纤输出耦合器前端插入可调谐光纤光栅滤波器, 通过对其调节使进入非 3 dB 耦合器的信号光波段发生偏移, 这种偏移造成未调节前波段的光波由于损耗增大而被抑制, 其附近波段的光波损耗减小而进入非 3 dB 耦合器, 产生新的相干干涉, 在腔内建立新的增益与损耗平衡关系. 由于非线性效应和模式竞争的作用, 激光器输出激光的中心波长会根据增益与损耗平衡关系的改变发生相应的变化.

## 2 实验结果及讨论

实验中先固定可调谐光纤光栅滤波器在某一状态, 调节偏振控制器 PC<sub>1</sub>、PC<sub>2</sub> 使得激光器在中心波长 1 050 nm 附近产生锁模脉冲输出, 随即锁定偏振控制器, 调节可调谐光纤光栅滤波器的机械旋钮, 使锁模脉冲在 1 047 nm~1 055 nm 范围内连续调谐, 图 2 给出了实验中测得的部分光谱图.

从输出光谱可看出中心波长在 1 047 nm~1 055 nm 范围内时, 锁模状态很好, 如图 2(b)、(c). 光谱显示脉冲能量集中在中心波长, 而且光谱光滑干净, 光谱带宽为 1 nm; 而当调节可调谐光纤光栅滤波器, 使激光器在 1 047 nm、1 055 nm 处锁模时, 光谱如图 2(a)、(d), 锁模状态变得不稳定, 光谱的中心波长顶端出现多峰, 脉冲能量出现分离, 光谱带宽有所展宽, 但是模拟示波器显示激光器仍然锁模运行. 若再向两侧方向调节时, 锁模状态将消失. 这是由于受到偏振控制器及激光腔腔型结构的限制, 产生锁模脉冲的信号光也有一定的带宽范围, 当进入非线性光纤环形镜信号光波段超出锁模带宽范围后, 锁模状态将不能继续稳定的维持, 就会出现失锁现象. 如反向调节可调谐光纤光栅滤波器, 使进入非线性光纤环形镜信号光波段再次进入锁模带宽范围, 则又重新获得稳定锁模脉冲输出, 且对应波长的光谱与正向调节时完全相同. 由此可知本可调谐激光器系统具有良好的可重复性和稳定性.

在中心波长为 1 053 nm 时, 光纤耦合器 coupler<sub>2</sub> 输出端测得输出平均功率 8.02 mW. 光纤激光器输出平均功率与中心波长的关系如图 3. 由图 3 可知调谐过程中功率输出变化范围在 1 mW 以

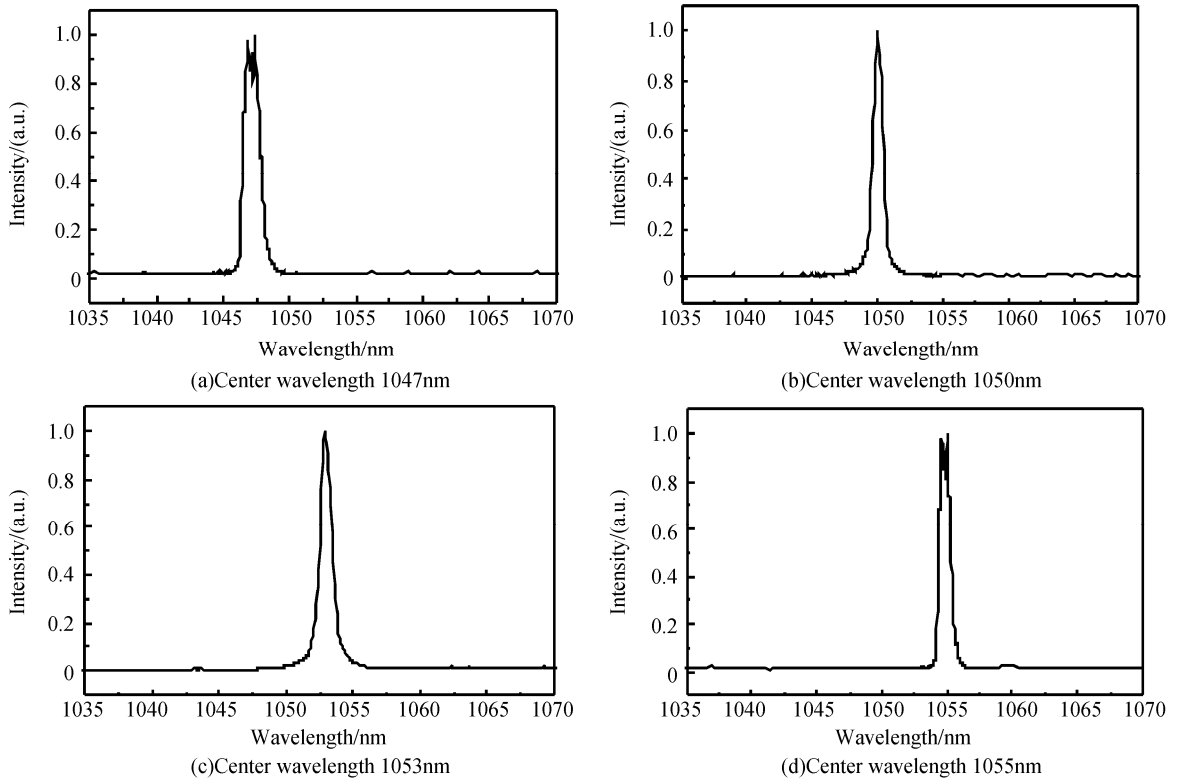


图2 波长可调谐输出光谱

Fig. 2 Spectrum of output pulse at the wavelength tuning

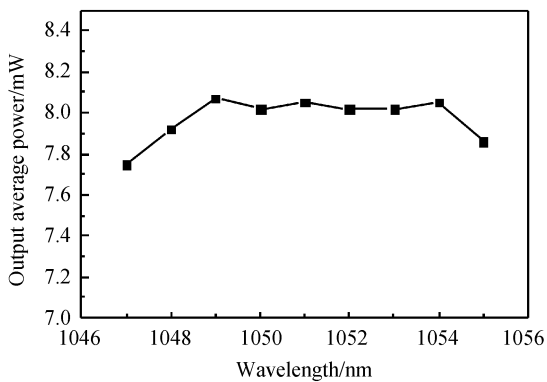


图3 光纤激光器输出峰值功率与中心波长的关系

Fig. 3 Relations between output average power and wavelength

内,证明该光纤激光器调谐过程中输出平均功率较为稳定.

通过快速响应光电探测器和模拟示波器观察到调谐过程中锁模脉冲如图4.图4(a)是锁模脉冲序列,整齐的脉冲序列和清晰的实脉冲顶点说明调谐

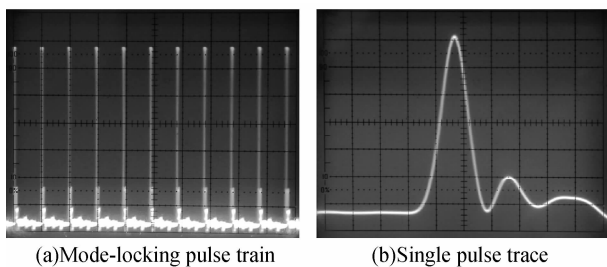


图4 锁模脉冲

Fig. 4 Mode-locking pulse

过程中锁模状态一直很好,图4(a)中每格代表0.2 μs,脉冲重复频率为4.9 MHz;图4(b)是单个锁模脉冲图,由于快速响应光电探测器的响应速度不够,造成单脉冲出现拖尾现象.

用自相关仪测的中心波长位于1053 nm时脉冲自相关迹如图5中点迹表示.在假定输出为 Gauss 脉冲的情况下,用自相关仪软件拟合如图中实线所示.从图5中可知,得到的脉冲比较光滑且没有底座,脉宽为259.3 ps;采用 Gauss 曲线拟合结果表明,这锁模光纤激光器输出脉冲是类 Gauss 型的.

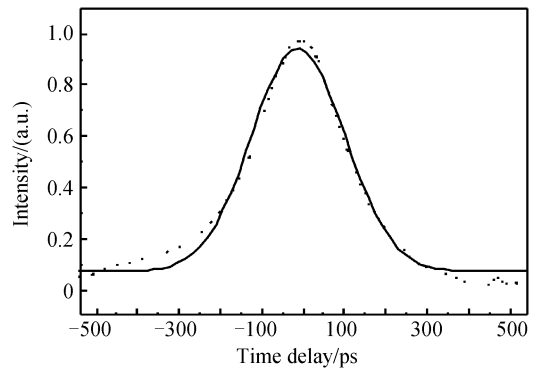


图5 锁模脉冲自相关曲线及 Gauss 脉冲拟合曲线

Fig. 5 Autocorrelation of output pulse and Gauss Fit trace

### 3 结论

本文通过调节在腔内加入可调谐光纤光栅滤波器来实现对激光器输出锁模脉冲的波长连续可调谐.在实验中得到激光器输出的锁模脉冲中心波长

在 1 047 nm~1 055 nm 范围内连续调谐,重复频率稳定的维持在 4.9 MHz,模拟示波器上显示锁模状态始终很稳定,且锁模过程可以完全自启动,并能长时间稳定工作.在锁模中心波长 1 053 nm 处,测得输出平均功率为 8.02 mW,光谱带宽 1 nm,脉冲宽度为 259.3 ps.该波长可调谐被动锁模掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器能提供 1 μm 附近不同波长激光超短脉冲输出,适用于大量应用的高能量超短脉冲种子光源,特别是对作为光参量振荡器的泵浦源很有吸引力.

#### 参考文献

- [1] YANG Shi-quan, LI Zhao-hui, XIANG Yang, *et al.* Wavelength tunable dual-wavelength actively mode-locked fiber laser with IP LD as modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 472-475.  
杨石泉, 李朝晖, 项阳, 等. 用半导体激光器作调制器的双波长可调谐锁模光纤激光器[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4): 472-475.
- [2] FENG Xin-huan, FAN Wan-de, YUAN Shu-zhong. Study of the lasing wavelength in DBR Yb<sup>3+</sup>-Doped fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12): 1417-1420.  
冯新焕, 范万德, 袁树忠, 等. DBR 掺镱光纤激光器激光波长的研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(12): 1417-1420.
- [3] CHEN Guo-fu, WANG Xian-hua, LIU Dong-fen. Observation of the stability of all fiber femto-second lamp-house[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(2): 148-151.  
陈国夫, 王贤华, 刘东峰. 稳定的全光纤飞秒激光光源[J]. *光子学报*, 2001, **30**(2): 148-151.
- [4] XU Hua-bin, CHEN Lin. Studies on the output characteristics of erbium-doped fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 777-781.

- 徐华斌, 陈林. 掺铒光纤激光器输出特性的研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(7): 777-781.
- [5] ZHANG Liang, ZHANG Jian, QIN Li, *et al.* Study on high-energy ytterbium-ions-doped fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 975-979.  
张亮, 张健, 秦莉, 等. 高能掺镱离子光纤激光器的研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(7): 975-979.
- [6] LEFORT L, PRICE JHV, RICHARDSON DJ, *et al.* Practical low-noise stretched-pulse Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2002, **27**(5): 291-293.
- [7] WU Jin, WAN Chong-yi, KE Chang-jun, *et al.* Theoretical calculation on TEA CO<sub>2</sub> laser tuned by a low fineness F-P interferometer[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(2): 145-148.  
吴谨, 万重怡, 柯常军, 等. 低锐度 F-P 干涉具调谐 TEA CO<sub>2</sub> 激光器理论分析[J]. *光电子 · 激光*, 2003, **14**(2): 145-148.
- [8] YU You-long, TAN Ha-ya, WANG Qi. Technique for wavelength selectable fiber ring-laser[J]. *Chinese J of Lasers*, 2002, **29**(1): 1-4.
- [9] GUAN Bai-ou, GUO Zhuan-yun, LIU Zhi-guo, *et al.* Tunable all fiber erbium-doped fiber ring laser with large tuning range[J]. *Chinese J of Lasers*, 2000, **27**(3): 197-199.
- [10] JIN-Hyoung L, WON-Taek H. Fine wavelength tuning of multiwavelength fiber laser with application of strain on cascaded long-period fiber gratings[C]. COIN + PS 2002, paper COIN. WeE1: 300-302.
- [11] HUANG Xiu-jiang, LIU Yong-zhi. A widely tunable Yb<sup>3+</sup>-Doped fiber ring laser[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2005, **16**(7): 771-774.  
黄绣江, 刘永智. 宽带可调谐掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤环形腔激光器[J]. *光电子 · 激光*, 2005, **16**(7): 771-774.

## Continuously Tuning Fiber Lasers with Wavelength of Mode-locked Pulses

LI Zhe<sup>1,2</sup>, ZHAO Wei<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2</sup>, CHEN Guofu<sup>1</sup>, WANG Yishan<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, 710119, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Received date: 2007-04-23

**Abstract:** It was reported that Yb<sup>3+</sup>-doped fiber lasers with figure-of-eight cavity using the manual tunable fiber Bragg grating that can achieve wavelength continuous tuning in mode-locked operating. In the experiment, by adjusting the manual tunable fiber Bragg grating and control the transmission of the light through the filter band, the operating center wavelength of the fiber lasers could be tuned from 1 047 nm to 1 055 nm and pulse duration at a repetition rate of 4.9 MHz. The fiber laser could generate 8.02 mW output average power of 259.3 ps pulse duration when the operating center wavelength was at 1 053 nm and spectrum width was about 1 nm. The mode-locked fiber lasers can achieve wavelength continuous tuning in mode-locked operating and keep stable for a long time.

**Key words:** Wavelength continuous tuning; Mode-locked pulses; Manual tunable fiber Bragg grating; Figure-of-eight laser cavity; Fiber lasers; Yb<sup>3+</sup>-doped fiber

**LI Zhe** received the B. S. degree from Northwestern Polytechnical University. Now, he is studying for his M. S. degree at State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His research interests focus on fiber laser, amplifier and nonlinear fiber optics.