

doi: 10.3788/gzxb20124103.0267

# 环形腔被动锁模掺饵光纤激光器

陈祖聪, 阮双琛, 郭春雨, 胡学娟, 欧阳德钦

(深圳大学 激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060)

**摘 要:**通过在线性偏振旋转环形腔内引入一种可旋转的在线起偏器,在保证装置的全光纤化结构的前提下,简化了被动锁模光纤激光器的结构.通过联合调节可旋转的在线起偏器、1/2 波片和 1/4 波片的角度实现了掺饵光纤锁模脉冲 20 nm 间隔的双波长调谐输出,调谐过程中观察到了锁模脉冲双波长状态.另外,从装置中去掉 1/2 波片后,仅调谐可旋转的在线起偏器和 1/4 波片也能够实现锁模脉冲的单波长稳定输出.

**关键词:**在线旋转起偏器;可调谐;被动锁模;光纤激光器

中图分类号:TN248

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)03-0267-4

## 0 引言

近年来,光纤激光器由于其效率高,光束质量好,稳定性高,可调谐等特点而发展迅速.而超短脉冲产生作为一门新技术在超快光学、超连续谱产生、通信等领域有着广泛的应用.在众多产生超快脉冲的技术中,锁模技术由于成本低、结构简单而受到广泛的商业应用.迄今为止,全光纤化的被动锁模可以分为以下几类:可饱和吸收体锁模,非线性放大环形腔锁模,非线性光学环形腔锁模和非线性偏振旋转锁模.非线性偏振旋转环形腔结构中常需要两个偏振控制器来调整腔内的激光偏振态来获取锁模脉冲,由于有 6 个自由度需要调整<sup>[1-11]</sup>,从而使得被动锁模脉冲的调节繁琐化. F. O' Ilday 等人通过在线性偏振旋转环形腔内插入一组波片以及偏振分束器获得了 200 MHz 的飞秒脉冲<sup>[12]</sup>. 2009 年,白晶通过引入低正色散的光纤,在环形腔内获得低阈值的飞秒脉冲<sup>[13]</sup>. 2008 年,张伟通过在 8 字腔内引入偏振相关器件获得高消光比的锁模脉冲<sup>[14]</sup>. 文献 [1-14]]通过在腔内插入两个偏振控制器调节锁模脉冲的输出. 2008 年,杨玲珍通过非线性光纤环形镜加脉冲锁模技术及可调谐光纤光栅滤波器,只需要在腔内插入一个偏振控制器实现了锁模波长可调谐输出<sup>[15]</sup>. 本文通过引入可旋转在线起偏器,将其插入腔内作为锁模器件获得锁模脉冲.该装置所需要的器件少,当旋转起偏器调整到合适的角度时,只需调节插入腔内的两个波片角度就能够获得稳定的锁

模脉冲双波长输出.进一步研究发现,腔内只需要 1/4 波片和可旋转的在线起偏器就能实现锁模脉冲的稳定单波长输出.这种结构减少了可调节自由度,易于实现掺饵锁模脉冲的全光纤化,集成化与模块化.

## 1 实验装置及机理

实验装置如图 1. 功率为 500 mW 的 980 nm 半导体激光器作为泵浦源,20 m 长的掺饵光纤作为增益,其在 975 nm 处的吸收系数为 7 dB/m,激光从 10:90 的耦合器端口输出. 型号为 YOKOGAWA AQ6370 B(600~1700 nm)的光谱仪测量激光的频谱,快速光电探测器(NEWPORT 818BB-31)探测激光的波形,其最快响应时间为 2 ns. 腔内插入隔离度为 30 dB 的偏振无关的隔离器保证光路的正向运行.可旋转的在线起偏器,波片和光纤之间构成了一个等效的可饱和吸收体,可对激光整形以及调谐.激

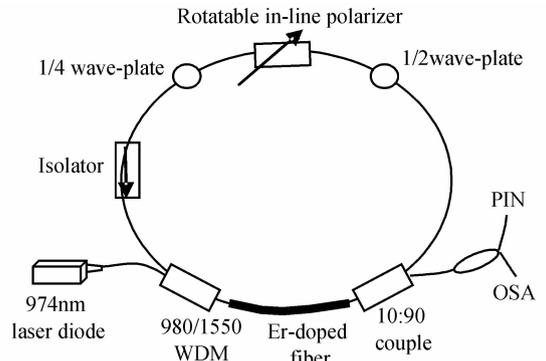


图 1 环形腔锁模装置

Fig. 1 The experimental configuration

基金项目:高校博士学科专项基金(No. 20104408110002)和深圳市基础研究重点计划项目(No. JC201005250048A)资助  
第一作者:陈祖聪(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向为锁模光纤激光器. Email: chenzucong\_2005@163.com  
导师(通讯作者):阮双琛(1963-),男,教授,主要研究方向为光纤激光器与超连续谱光源. Email: scruan@szu.edu.cn  
收稿日期:2011-09-13;修回日期:2011-12-09

光通过可旋转在线起偏器后形成线偏振光,再经过 $\lambda/4$ 波片形成椭圆偏振光,在随后的光纤传输中,由于非线性旋转效应,激光的峰值和脉冲的两翼会有不同的旋转角度,经过长时间的积累,当峰值和两翼偏振旋转角度相差 $90^\circ$ 时,合理的调整 $\lambda/2$ 波片的角度使激光峰值完全透过起偏器而阻挡两翼,此时会形成锁模脉冲输出.该装置的透过率公式可表示<sup>[16]</sup>

$$T = \cos^2 \alpha \cos^2 \beta + \sin^2 \alpha \sin^2 \beta + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \sin 2\beta \cos(\delta_L + \delta_{NL}) \quad (1)$$

$$\delta_{NL} = \frac{-2\pi n_2 P_0 L}{\lambda A_{\text{eff}}} \cos 2\alpha \quad (2)$$

式中, $\delta_L$ 和 $\delta_{NL}$ 分别是线性相位与非线性相位, $n_2$ 是非线性系数, $L$ 是腔长. $P_0$ 是激光的峰值功率, $\lambda$ 是工作波长, $A_{\text{eff}}$ 为有效模场面积. $\alpha$ 是输入激光的偏振方向与单模光纤快轴的夹角, $\beta$ 是单模光纤的快轴和起偏器起偏方向的夹角.从式(1)中可以看出,当通过旋转波片改变 $\alpha$ 和 $\beta$ 的角度时,透过率将会随着波长 $\lambda$ 、功率 $P_0$ 而呈周期性的改变,与此对应的结果是激光可调谐性和工作状态的改变.

## 2 实验与讨论

在泵浦功率为200 mW时,测得掺铒光纤的荧光光谱.如图2,掺铒荧光光谱在1550 nm和1560 nm附近出现峰值,并且1560 nm处的峰值为最大.调节可旋转起偏器的角度使得脉冲起振,随后细调两个波片的角度,容易得到平滑的锁模脉冲输出,图3为得到的脉冲序列及功率曲线.从图中可以看出,锁模脉冲的功率曲线具有较好的线性,其泵浦功率阈值为80 mW,输出阈值为2 mW,随着泵浦功率的增大,其输出功率也不断增大.在泵浦功率为240 mW时,获得了输出功率为8 mW的锁模脉冲.由于掺铒增益光纤的长度较长,造成脉冲的重复频率较低,示波器显示为5.6 MHz.

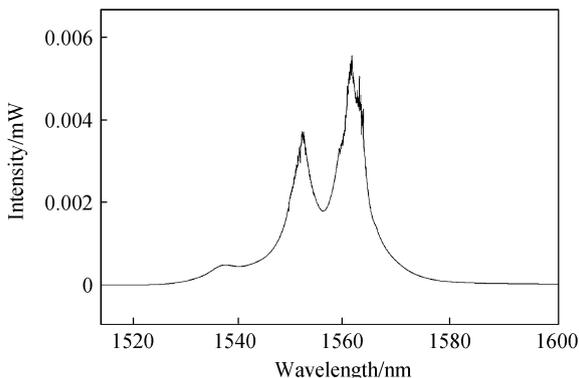


图2 掺铒光纤200 mW泵浦下的荧光光谱  
Fig. 2 The fluorescence of Er-doped fiber at pump of 200 mW

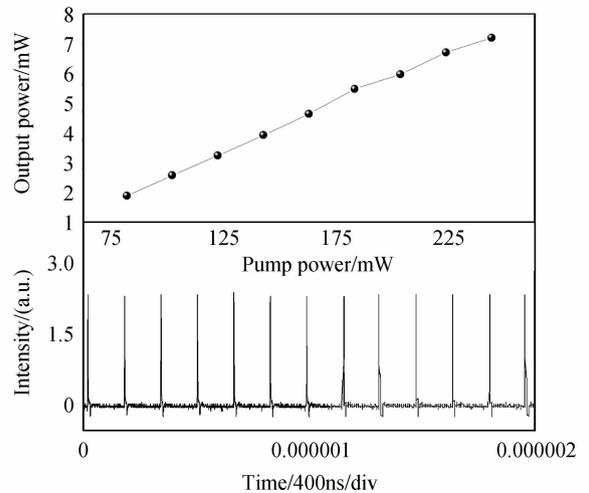


图3 锁模脉冲序列及功率曲线  
Fig. 3 Output power curve and mode-locked pulse train

图4为图3相应的锁模光谱图.可以看出,其中心波长为1572 nm,3 dB线宽为4 nm.继续调节两个波片的角度改变了中心波长的透过率,在另一个位置上出现稳定的锁模脉冲输出.如图5,该脉冲的中心波长调到了1592 nm处,3 dB线宽为7.7 nm.波长间隔为20 nm.

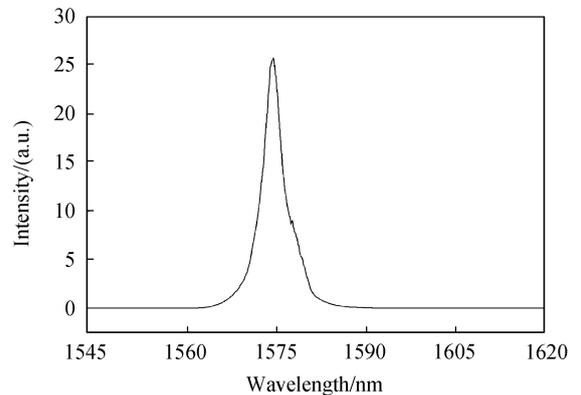


图4 中心波长在1572 nm的锁模光谱  
Fig. 4 Mode-locked spectrum centered at 1572 nm

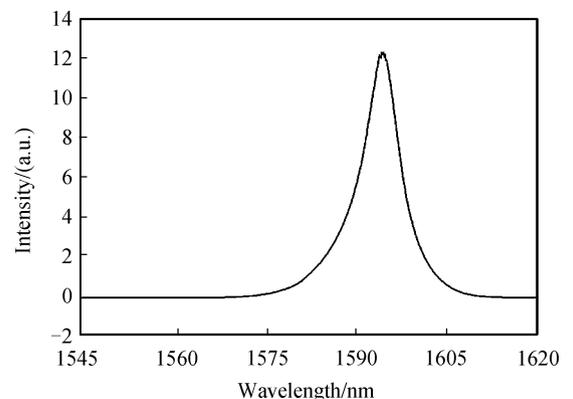


图5 中心波长在1592 nm的锁模光谱  
Fig. 5 Mode-locked spectrum centered at 1592 nm

改变可旋转在线起偏器的偏振角度,在调节波片的过程中,得到了双波长同时振荡的锁模脉冲输出,光谱如图6.其中心波长分别为1562 nm

和 1 579 nm, 对应的 3 dB 线宽分别为 6 nm 和 8 nm. 同时, 由于较长的掺铒光纤吸收了部分 1 580 nm 处的激光, 由此产生了自发辐射, 所以在 1 607 nm 处出现了荧光.

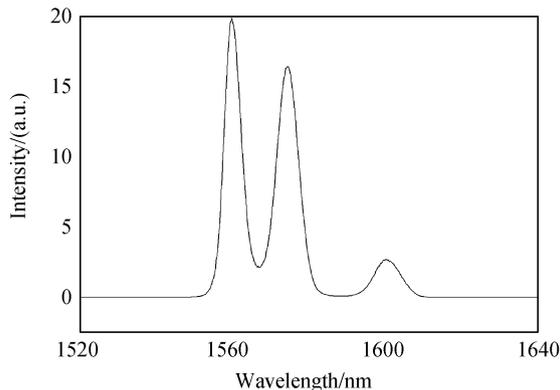


图 6 双波长的锁模光谱

Fig. 6 Mode-locked laser output with dual-wavelength

实验中去掉 1/2 波片, 仅调整可旋转在线起偏器和 1/4 波片的角度也能够实现稳定的脉冲输出. 这是由于在线起偏器可以旋转, 当激光峰值和两翼由于非线性效应产生的偏振旋转角度相差  $90^\circ$  时, 只要将可旋转在线起偏器旋转到激光峰值的方向, 就可以让峰值透过而阻挡两翼, 这样可以实现短脉冲输出而不需要 1/2 波片. 另一方面, 在去掉 1/2 波片的同时, 由于只剩下 1/4 波片和可旋转在线起偏器可以调整, 经过反复实验, 发现其锁模位置只有一个, 锁模装置已经没有波长调谐能力. 如图 7 所示, 调整可旋转在线起偏器和 1/4 波片的角度至稳定锁模位置, 锁模中心波长在 1 600 nm 附近. 继续调节可旋转在线起偏器和 1/4 波片至其他角度, 没有发现锁模脉冲的输出. 图 7、图 8 分别为去掉了 1/2 波片的锁模脉冲序列和频谱, 其脉冲重复频率为 5.8 MHz.

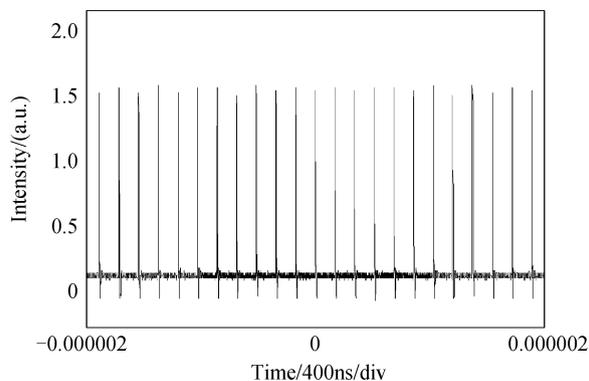


图 7 可旋转起偏器和 1/4 波片调节的脉冲序列

Fig. 7 Pulse train obtained by adjusting polarizer and 1/4 wave plate

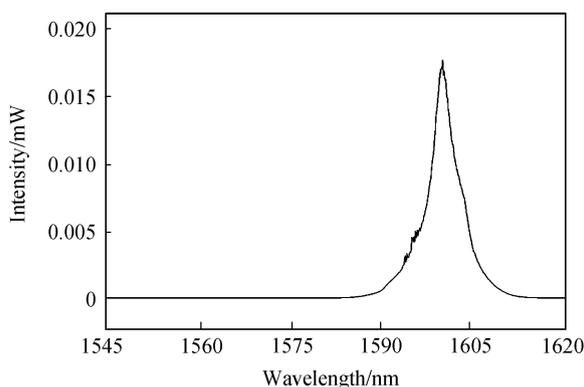


图 8 中心波长在 1 600 nm 的锁模光谱

Fig. 8 Mode-locked spectrum centered at 1 600 nm

### 3 结论

本文通过在环形腔内引入旋转起偏器获得锁模脉冲调谐输出, 调节腔内波片与偏振片分别得到 1 572 nm 波长和 1 592 nm 波长的锁模脉冲, 并且在调谐过程中还出现稳定的双波长锁模脉冲. 试验中发现在去掉 1/2 波片后, 仅调整 1/4 波片和起偏器也能使其工作在单波长锁模状态, 但不具备调谐波长能力. 这种结构具有简单, 便于调节等特点, 对于全光纤锁模脉冲的产品化与商用化具有一定的指导意义.

#### 参考文献

- [1] KIM A D, KUTZ J N, MURAKI D J, *et al.* Pulse-train uniformity in optical fiber lasers passively mode-locked by nonlinear polarization rotation [J]. *Journal of Quantum Electronics*, 2000, **36**(4): 465-471.
- [2] TU Cheng-hou, GUO Wen-gang, LI Yong-nan, *et al.* Stable multiwavelength and passively mode-locked Yb-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation [J]. *Optics Communications*, 2007, **280**(2): 448-452.
- [3] MATSAS V J, NEWSON T P, RICHARDSON D J, *et al.* Self starting passively mode-locked fiber ring soliton laser exploiting nonlinear polarization rotation [J]. *Electronics Letters*, 1992, **28**(15): 1391-1393.
- [4] FENG Xin-huang, TAM H, WAI P K A, *et al.* Stable and uniform multiwavelength erbium-doped fiber laser using nonlinear polarization rotation [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(18): 8205-8210.
- [5] IBARRA-ESCSMILLAB, POTTIEZ O, HAUS J W, *et al.* Wavelength-tunable picosecond pulses from a passively mode-locked figure-eight Erbium-doped fiber laser with a Sagnac fiber filter [J]. *Journal of the European Optical Society*, 2008, **3**(08036): 1-4.
- [6] SHEU Fang-wen, ChIOU Chung-yao, YANG Shu-chun, *et al.* Performance of a wavelength-tunable erbium-doped fiber laser using a Sagnac interferometer [J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(18): 4719-4722.
- [7] ZHANG Zu-xing, WU Jian, XU Kun, *et al.* Polarization-dependent output states of a fiber laser with nonlinear polarization rotation [J]. *Optical Engineering*, 2008, **47**(8): 085002-1-085002-3.

- [8] SONG Chuang-xing, XU Wen-cheng, LUO Zhi-chao, *et al.* Switchable and tunable dual-wavelength ultrashort pulse generation in a passively mode-locked erbium-doped fiber ring laser[J]. *Optics Communications*, 2009, **282**(22): 4408-4412.
- [9] AMRANI F, SALHI M, LEBLOND H, *et al.* Intricate solitons state in passively mode-locked fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(14): 13134-13139.
- [10] LIU Xue-ming. Coexistence of strong and weak pulses in a fiber laser with largely anomalous dispersion [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(7): 5874-5887.
- [11] MORTAG D, WANDT D, MORGNER U, *et al.* Sub-80-fs pulses from an all-fiber-integrated dissipative-soliton laser at 1  $\mu\text{m}$ [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(2): 546-551.
- [12] ILDAY F Ö, CHEN J, KARTNER F X. Generation of sub-100-fs pulses at up to 200 MHz repetition rate from a passively mode-locked Yb-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2005, **13**(7): 2716-2721.
- [13] BAI Jing, WANG Yi-shan, CHEN Guo-fu, *et al.* Low threshold stretched-pulses mode-locked Er<sup>3+</sup>-doped fiber laser with ring cavity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 237-240.
- [14] ZHANG Wei, LI Zhe, CHEN Guo-fu, *et al.* Study on high extinction ratio ytterbium-doped mode-locked fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **37**(7): 1297-1300.  
张伟,李喆,陈国夫,等. 高消光比掺 Yb<sup>3+</sup> 锁模脉冲光纤激光器研究[J]. 光子学报, 2009, **37**(7): 1297-1300.
- [15] GUO Xiong-ying, YANG Ling-zhen, HE Hu-cheng, *et al.* Wavelength tunable mode-locked pulse fiber laser based on figure-of-eightcavity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 212-214.  
郭雄英,杨玲珍,贺虎成,等. 8字形腔波长可调谐锁模脉冲光纤激光器[J]. 光子学报, 2008, **37**(2): 212-214.
- [16] LUO Zhi-chao, LUO Ai-ping, XU Wen-cheng, *et al.* Tunable multiwavelength passively mode-locked fiber ring laser using intracavity birefringence-induced comb filter[J]. *Photonics Journal*, 2010, **2**(4): 571-577.

## Passively Mode-locked Erbium Doped Fiber Ring Laser

CHEN Zu-cong, RUAN Shuang-chen, GUO Chun-yu, HU Xue-juan, OU-YANG De-qin  
(Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Electronic Science and Technology,  
Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

**Abstract:** By introducing the rotatable in-line polarizer into the ring cavity of nonlinear polarization rotation(NPR), the all fiber structure of passively mode-locked ring laser is simplified. The Erbium-doped mode-locked laser with the tuning range of 20 nm is achieved by adjusting the polarizer, 1/2 wave plate and the 1/4 wave plate together. Furthermore, the mode-locked pulses with dual-wavelength are observed during the tuning process. On the other hand, when removing the 1/2 wave plate from the configuration, the mode-locked laser can also be obtained by only adjusting the polarizer and the 1/4 wave plate. The tunable process is presented and analyzed.

**Key words:** Rotatable in-line polarizer; Tunable; Passively mode-locked; Er-doped fiber laser