

文章编号: 1001-3806(2007)01-0077-03

## 利用非线性偏振旋转锁模技术产生 0.7nJ, 1.5ps 光脉冲

贺虎成, 杨玲珍, 王云才 \*

(太原理工大学 物理系, 太原 030024)

**摘要:** 为了研究锁模光纤激光器以增益平坦型掺铒光纤放大器作为增益介质对输出特性的影响, 采用增益平坦型掺铒光纤放大器结合光纤偏振控制器、偏振相关光隔离器组成锁模光纤激光器, 基于非线性偏振旋转锁模技术, 实现稳定、自起振锁模运转, 得到了中心波长 1560nm、重复频率 6.495MHz、单脉冲能量 0.7nJ、脉宽 1.5ps 的超短光脉冲。同时实验观察到峰值波长为 1557nm 和 1570nm 的双峰值波长锁模脉冲的产生。结果表明, 采用增益平坦型掺铒光纤放大器替代普通掺铒光纤组成锁模光纤激光器, 可获得较高单脉冲能量的超短光脉冲, 锁模脉冲的输出光谱可能出现双峰结构, 从而可为超短脉冲光纤激光器设计及实用化提供参考。

**关键词:** 超快光学; 光纤激光器; 非线性偏振旋转; 被动锁模; 掺铒光纤放大器

**中图分类号:** TN248

**文献标识码:** A

### Generation of 1.5ps pulses with 0.7nJ of energy based on polarization additive pulse mode-locking

HE Hu-cheng, YANG Ling-zhen, WANG Yun-cai

(Department of Physics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The dynamics characteristics of a mode-locking laser using a gain-flattened erbium doped fiber amplifier are reported. Based on polarization additive pulse mode locking technique, a self-starting mode-locking of the fiber laser was demonstrated with a gain-flattened erbium doped fiber amplifier, fiber polarization controllers and a polarization dependent isolator. The stable optical pulses train at 1560nm center wavelength and 6.495MHz repetition rate was generated, with 1.5ps pulse width and 0.7nJ pulse energy. Mode locked pulses with dual peak-wavelengths at 1557nm and 1570nm were also observed. The results of the experiment indicate that higher energy of the pulses can be generated by the fiber laser with a gain-switched erbium doped fiber amplifier than that with a general erbium doped fiber. The mode-locked pulse spectrum of the fiber laser with a gain-flattened erbium doped fiber amplifier could show dual peak structure. It's valuable to the design and practicability of the ultra-short fiber lasers.

**Key words:** ultrafast optics; fiber laser; nonlinear polarization rotation; passively mode locking; erbium doped fiber amplifier

## 引 言

稳定的超短光脉冲源在超快光学技术、超快电子技术、超快生物学技术、超快光谱学技术等领域有着重要的应用。尤其在通信波段的超短光脉冲源是超高速光纤通信和光孤子通信不可缺少的光源。基于非线性偏振旋转效应的被动锁模光纤激光器具有结构简单、可自起振、抽运阈值低、工作稳定、输出脉宽窄等特点<sup>[1,2]</sup>, 并且可以有效产生皮秒乃至飞秒的超短脉冲。

1992 年, 由 MATSAS 首次提出后<sup>[3]</sup>, 得到国内外学者们的广泛重视<sup>[4~6]</sup>。目前使用此方法实现中心波长在 1550nm 附近输出的光纤激光器采用的增益介质主要有普通掺铒光纤、正常色散掺铒光纤等。采用普通掺铒光纤作为增益介质可产生最短达几百飞秒的超短光脉冲<sup>[7]</sup>, 然而采用普通掺铒光纤的光纤激光器当抽运功率过高会引起孤子分裂而形成多脉冲输出, 输出脉冲的单脉冲能量仅为几十皮焦; 采用正常色散掺铒光纤, 可以和普通单模光纤组成总色散接近零的腔体, 从而可以得到单脉冲能量较高, 脉宽较短的超短光脉冲<sup>[8]</sup>, 然而正常色散掺铒光纤比较昂贵, 使得激光器成本较高。作者在实验中采用商用的增益平坦型掺铒光纤放大器组成光纤激光器, 结合非线性偏振旋转锁模技术, 获得了稳定的单脉冲能量达 0.7nJ、脉宽 1.5ps 超短光脉冲。

基金项目: 山西省留学归国人员科研启动基金资助项目 (200417)

作者简介: 贺虎成 (1981-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超短脉冲光纤激光器。

\* 通讯联系人。E-mail: wangyc@tyut.edu.cn

收稿日期: 2005-12-07; 收到修改稿日期: 2006-02-22

## 1 实验装置及原理

实验装置如图 1 所示,被动锁模光纤激光器由掺铒光纤放大器 (erbium doped fiber amplifier, EDFA)、偏振相关光隔离器 (polarization dependent isolator, PDI)、两个光纤偏振控制器 (polarization controller, PC)、输出光纤耦合器等组成。所用掺铒光纤放大器为武汉邮电研究所生产,其增益谱线如图 2 所示,由于具有 59nm

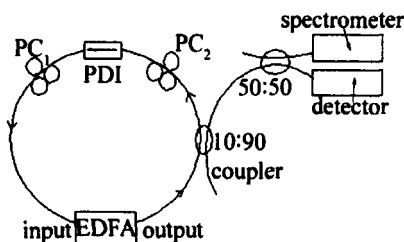


Fig 1 Experiment setup of passively mode locked fiber laser

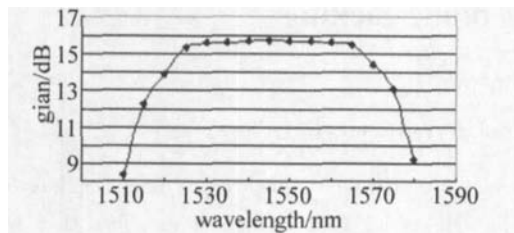


Fig 2 Gain vs wavelength of EDFA

的 3dB 增益带宽,理论上可以支持飞秒量级光脉冲的产生。偏振相关光隔离器的偏振相关损耗为 30dB。光纤偏振控制器是利用弹光效应改变光纤中的双折射来控制光纤中光波的偏振态。光纤耦合器的分光比为 10:90。各光纤元器件通过光纤连接器连接,实验测量整个激光器谐振腔的损耗为 2.8dB。实

验中激光器输出的时域特性利用示波器 (TDS3052) 结合超快光电探测器 (XPDV2020) 来观测,光谱特性由光谱仪 (Agilent86140B) 观测,锁模脉冲的脉宽由自相关仪 (APE-Pulse Check TC) 测量。

光纤激光器被动锁模的原理是利用非线性偏振旋转的自振幅调制作用。时域上,经过偏振相关光隔离器后的线偏振光,再经过一个偏振控制器 (PC<sub>1</sub>) 后变成椭圆偏振光,由于腔内光纤的非线性效应,脉冲在光纤中传输时椭圆偏振状态发生与强度相关的旋转,脉冲峰值部分和前后沿部分的偏振状态不同,通过调节两个偏振控制器可使脉冲峰值部分通过偏振相关隔离器的损耗最小,而前后沿部分损耗较大,使脉冲得到压窄,多次循环后形成稳定的超短光脉冲。从频率上分析,在脉冲形成初始阶段,达到阈值的激光频率,经过利用非线性偏振旋转形成的类可饱和吸收体时,在增益选择作用下只剩下高增益的中心频率及其边频,随后再经过类可饱和吸收体的作用和工作物质的放大,边频信号又激发新的边频,如此继续下去,增益线宽内所有的模式都参与振荡,光谱得到展宽。

## 2 实验结果及讨论

光纤激光器可以工作在两个稳定状态:连续输出状态和锁模输出状态。其工作状态主要取决于激光器的抽运功率以及偏振控制器的状态。当激光器抽运功率低于锁模阈值抽运功率时,激光器工作在连续输出状态;当激光器的抽运功率达到阈值功率后,通过调节两个偏振控制器可实现激光器的自起振,并稳定工作在锁模状态。图 3 为抽运功率为 100mW 时得到的稳

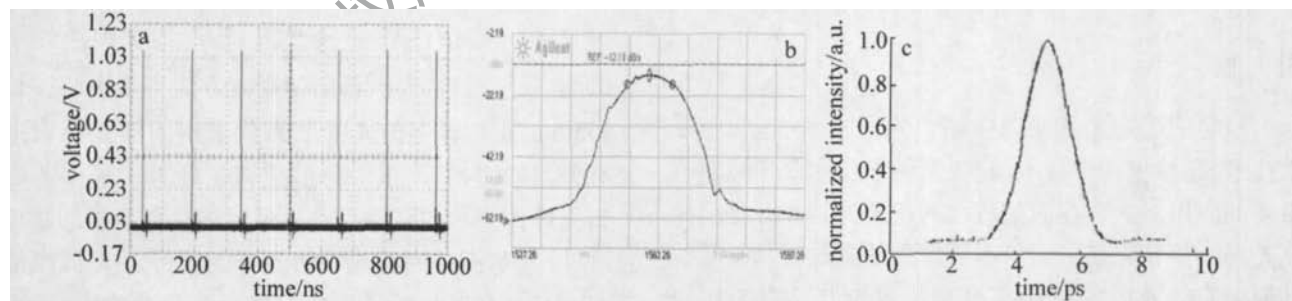


Fig 3 a—mode locked pulse train b—output spectrum obtained with 100mW pump power c—autocorrelation of mode locked pulse

定锁模脉冲列 (见图 3a)、光谱图 (见图 3b) 和自相关图 (见图 3c)。得到的光脉冲重复频率为 6.495MHz,中心波长为 1560nm,相应的光谱带宽为 10nm。通过对自相关图进行拟合比较,可以推断产生的光脉冲为双曲正割型,脉冲宽度即为 1.5ps。计算得到锁模脉冲的时间带宽积为 1.9。而双曲正割型脉冲的变换极限为 0.315,这说明输出脉冲啁啾较大。这是因为光纤激光器的腔长比较长,总色散比较大。

实验中还发现:达到阈值功率后,抽运功率变化对

锁模脉冲脉宽几乎没有影响,而改变光纤偏振控制器的状态,锁模脉冲的脉宽及光谱均受到影响。这与文献 [5] 中所报道基本上相一致。在文献 [5] 和文献 [7] 中,当抽运功率较高时,会出现多脉冲现象,限制了输出功率的进一步提高,这是由孤子分裂引起的。作者在实验中采用增益平坦型掺铒光纤放大器,增益区较长,整个腔的色散值较大,提高了发生孤子分裂所需要的抽运功率,从而提高了单脉冲能量。在抽运功率达 100mW 时,仍没有出现多脉冲现象,此时利用光功率

计测得锁模光纤激光器的平均输出功率为 4.38mW, 则其单脉冲能量为 0.7nJ。

保持抽运功率为 100mW, 调节偏振控制器波片在某角度时, 激光器工作在双峰值波长锁模状态, 即锁模脉冲的输出光谱出现双峰结构如图 4 所示, 峰值波长

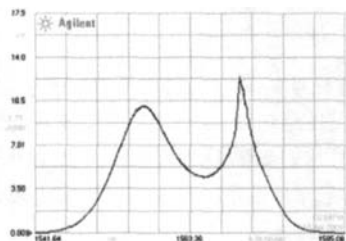


Fig 4 Output spectrum of two-peak wavelength mode locked pulse

为 1557nm 和 1570nm。锁模脉冲宽度、重复频率与单峰值波长锁模时比较没有明显变化。当将抽运功率降低到锁模阈值以下时, 光纤激光器输出具有两个峰值波长的连续光。其原因如下: 利用非线性偏振旋转锁模技术时, 激光腔内损耗与激光光的初始偏振态有一定关系, 而不同波长的光通过偏振控制器后的偏振状态的改变不同, 这样通过偏振控制器改变偏振态来实现锁模的同时, 可能使得增益线宽内某些波长的损耗相对较低, 而其增益相差不大, 从而形成双峰值波长的锁模状态。

根据非线性偏振旋转锁模原理, 若将输出耦合器放置于偏振相关光隔离器之后, 由于减少了脉冲在光纤中的传输距离, 光脉冲受色散影响较小, 可得到更窄的光脉冲输出。然而此时由于增加了从掺铒光纤放大器输出脉冲传输距离, 故输出功率有所降低。实验中仍将抽运功率设置为 100mW, 获得了 1.2ps 的锁模脉冲, 对应光谱宽度为 12nm, 输出功率为 2.35mW, 由于没有改变激光器腔长, 重复频率仍为 6.495MHz。图 5 为输出耦合器分别在掺铒光纤放大器之后、偏振相关

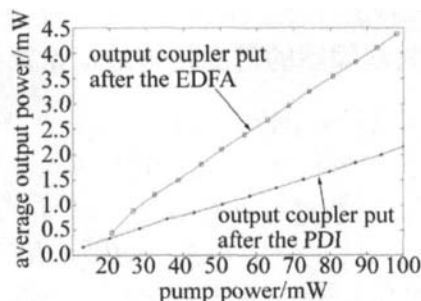


Fig 5 Average output power vs pump power

光隔离器之后两处, 光纤激光器锁模时平均输出功率随抽运变化的曲线, 从图中看出: 当抽运功率为 100mW 时, 其平均输出功率没有出现饱和的趋势。若采用增益更高的掺铒光纤放大器或降低腔内损耗, 应可得到单脉冲能量更高的超短脉冲。

### 3 结 论

基于非线性偏振旋转锁模技术, 采用增益平坦型掺铒光纤放大器与偏振相关光隔离器、光纤偏振控制器等构成锁模光纤激光器, 实现稳定的、自起振被动锁模运转, 获得了中心波长 1560nm、重复频率 6.495 MHz、单脉冲能量达 0.7nJ、脉冲宽度为 1.5ps 的超短光脉冲。同时实验观察到峰值波长为 1557nm 和 1570nm 的双峰值波长锁模脉冲的产生。锁模脉冲输出特性与输出耦合器在腔内的位置有一定关系, 若要获得输出功率较高的超短光脉冲, 则可以将输出耦合器置于掺铒光纤放大器之后; 若要获得脉宽较短的光脉冲, 则可以将输出耦合器置于偏振相关光隔离器之后。实验中所采用增益平坦型掺铒光纤放大器的增益线宽较普通掺铒光纤宽, 理论上应可支持较短脉宽输出, 然而由于没有进行色散补偿, 得到的光脉冲啁啾较大, 若采用正常色散补偿光纤来代替实验中的普通单模光纤, 则可获得脉宽更短、啁啾较小的超短脉冲。

### 参 考 文 献

- [1] YANG L Z, CHEN G F, WANG Y Sh *et al* Study of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped fiber ring laser of ultrashort pulse [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33 (4): 389 ~ 392 (in Chinese).
- [2] SUN J Q, HUANG D X. Control of self-pulsation in  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16 (9): 1237 ~ 1240 (in Chinese).
- [3] MATSAS V J, NEWSON T P, RICHARDSON D J *et al* Self-starting passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarization rotation [J]. *Electron Lett*, 1992, 28 (15): 1391 ~ 1393.
- [4] LIU D F, CHEN G F, WANG X H *et al* Structure stable  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber ring laser [J]. *Laser Technology*, 1999, 23 (4): 231 ~ 233 (in Chinese).
- [5] WANG Zh Y, WANG Y Q, LI Sh Ch *et al* Self-starting passively mode-locked  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber lasers [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, 15 (3): 295 ~ 298 (in Chinese).
- [6] SALHIM, LEBLOND H, SANCHEZ E *et al* Theoretical study of the erbium-doped fiber laser passively mode-locked by nonlinear polarization rotation [J]. *Phys Rev*, 2003, A67 (1): 013802/1 ~ 013802/7.
- [7] LIU D F, CHEN G F, WANG X H *et al* Experiment research of self-starting passively mode-locked  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber ring soliton lasers [J]. *Science in China*, 1999, 29 (7): 656 ~ 661 (in Chinese).
- [8] RUEHL A, HUNDETMARK H, WANDT D *et al* 0.7W all-fiber erbium oscillator generating 64fs wave breaking-free pulses [J]. *Optics Express*, 2005, 13 (16): 6305 ~ 6309.
- [9] HUNDETMARK H, KRACHT D, ENGELBRECHT M *et al* Stable sub-85fs passively mode-locked erbium fiber oscillator with tunable repetition rate [J]. *Optics Express*, 2004, 12 (14): 3178 ~ 3183.
- [10] DAVEY R P, LANGFORD N, FERGUSON A L *et al* Role of polarization rotation in the modelocking of an Er fibre laser [J]. *Electron Lett*, 1993, 29 (9): 758 ~ 760.
- [11] NELSON L E, JONES D J, HAUS H A *et al* Ultrashort-pulse fiber ring lasers [J]. *Appl Phys*, 1997, B65 (2): 277 ~ 294.