

# 可调谐锁模脉冲环形腔掺铒光纤激光器

宋创兴 徐文成 罗智超 陈伟成 高玉欣 刘颂豪

(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)

**摘要** 报道了一种结构简单、波长稳定可调的被动锁模环形腔掺铒光纤激光器。利用非线性偏振旋转效应作为等效可饱和吸收体实现自起振被动锁模, 通过使用光纤偏振控制器和偏振相关光隔离器作为波长调谐器件, 在输出端使用输出耦合器为工作波长在  $1550 \pm 50$  nm 的宽带耦合器, 实现了光纤激光器的输出锁模脉冲激光中心波长较宽范围可调谐。实验上获得了低阈值自起振, 重复频率为 10.23 MHz, 中心波长在 1548.64~1600.24 nm 内连续可调, 边模抑制比大于 44 dB 的超短脉冲输出。

**关键词** 非线性偏振旋转; 波长调谐; 掺铒光纤激光器; 环形腔

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092905.1292

## Tunable Mode-Locked Pulsed Erbium-Doped Fiber Ring Laser

Song Chuangxing Xu Wencheng Luo Zhichao Chen Weicheng  
Gao Yuxin Liu Songhao

*Guangdong Provincial Laboratory of Photonic Information Technology, School of  
Information & Opto-Electronic Science and Engineering, South China Normal University,  
Guangzhou, Guangdong 510006, China*

**Abstract** A simple, stable wavelength tunable passively mode-locked erbium-doped fiber ring laser is reported. The nonlinear polarization rotation effect is used, as equivalent saturable absorber, to achieve the self-starting mode-locking in the laser. The wavelength tuning can be realized by simply rotating the orientation of polarization controllers. The output of the laser is taken via a wideband coupler, whose operating wavelength is  $1550 \pm 50$  nm. Experimentally, low self-starting threshold mode-locked pulses at 10.23 MHz repetition rate were obtained. The output wavelength was continuously tunable from 1548.64 nm to 1600.24 nm, and the side-mode suppression ratio was beyond 44 dB.

**Key words** nonlinear polarization rotation; wavelength tuning; erbium-doped fiber lasers; ring cavity

## 1 引 言

被动锁模环形腔掺铒光纤激光器由于其结构简单、起振阈值低、波长易调谐以及容易与光纤连接等优点, 正逐渐被人们所重视。利用非线性偏振旋转技术可以实现被动锁模获得超短脉冲<sup>[1~4]</sup>, 广泛应用到光纤通信和光纤传感等领域。而波长可调的超短脉冲光源是高速波分复用/光时分复用通信系统中的关键器件之一, 因此近年来对基于非线性偏振

旋转的可调谐被动锁模光纤激光器的报道层出不穷<sup>[5~11]</sup>。

本文报道了基于非线性偏振旋转(NPR)效应实现被动锁模环形腔光纤激光器。利用偏振调谐原理, 采用两个偏振控制器和一个偏振相关光隔离器实现波长调谐, 在输出端使用宽带耦合器实现了结构简单、工作稳定、自起振阈值低、重复频率为 10.23 MHz, 中心波长在 1548.64~1600.24 nm 内连续可调、边模抑制比大于 44 dB 的超短脉冲输出。

**收稿日期**: 2008-06-04; **收到修改稿日期**: 2008-09-22

**基金项目**: 广东省自然科学基金(04010397)资助课题。

**作者简介**: 宋创兴(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器、高码率光通信方面研究。E-mail: schxing26@163.com

**导师简介**: 徐文成(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 目前主要从事光纤激光器及其在高码率光通信系统中的应用等方面的研究。E-mail: xuwch@scnu.edu.cn (通信联系人)

## 2 实验装置与原理

图 1 为非线性偏振旋转被动锁模掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤环形腔激光器的实验装置图<sup>[12]</sup>。实验所用的增益介质为高掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤, 长度为 5 m, 吸收系数为 12.5 dB/m, 数值孔径为 0.22。为了减小损耗, 将 976 nm 半导体激光器、980 nm/1550 nm 波分复用器(WDM)及掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤直接焊接, 同时整个环形腔中均采用全光纤器件, 以保证光在全光纤环境下连续运转而不受外界环境的影响。其中, 976 nm 半导体激光器在经过 WDM 后的最大输出功率为 250 mW。PD-ISO 为特别订制的偏振相关光隔离器, 在实验系统中充当起偏器和偏振分析器的作用, 既将随机偏振入射的光波转变为线偏振光(起偏器的作用), 又起到与实现被动锁模的光强敏感的非饱和吸收体(偏振分析器)的作用。PC 为利用光纤弹光效应的全光纤在线偏振控制器, 用于改变光纤的双折射, 从而改变光纤内传输光的偏振态; Coupler 为输出耦合器, 实验中为了实现较宽的波长调谐范围, 使用宽带耦合器, 工作波长在  $1550 \pm 50$  nm, 耦合比为 90 : 10, 其中 10% 端为输出端。光纤环形腔总长度为 22 m。在输出端分别采用 Anritsu MS9710C 光谱分析仪、Tektronix 示波器、FR-103XL 自相关仪来对输出脉冲的光谱、重复率、脉冲宽度进行直接测量。

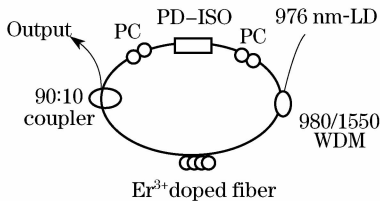


图 1 波长可调谐非线性偏振旋转被动锁模掺铒光纤激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of wavelength tunable nonlinear polarization rotation (NPR) passively mode-locked  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber ring laser

环形腔光纤激光器非线性偏振旋转效应等效于可饱和吸收体, 所以可以实现被动锁模, 其工作原理在文献<sup>[4, 12]</sup>中作了详尽的报道。光纤激光器实现可调谐输出的关键器件是偏振相关光隔离器和偏振控制器, 偏振相关光隔离器相当于一个偏振片和一个光隔离器的组合, 对不同偏振状态的光损耗不同。经过偏振相关光隔离器后不同波长的线偏振光在通过偏振控制器时经历了不同的相移, 其偏振状态改变不同, 形成不同偏振态的椭圆偏振光。偏振相关光隔离器将偏振态的差异转变为透射率的差异, 因

此通过调节偏振控制器可以控制各波长光脉冲的透射率, 从而实现各波长光脉冲间的强度均衡, 减小输出功率起伏, 扩大调谐范围。

通过隔离器的线偏振光经过偏振控制器后变成椭圆偏振光(功率为  $P_0$ ), 可看成相互正交的具有不同强度的线偏振光(沿光纤主轴  $x, y$ ), 其振幅分别为  $A_x = \sqrt{P_0} \cos \theta$ ,  $A_y = \sqrt{P_0} \sin \theta$  ( $\theta$  为偏振光和  $x$  轴的夹角)。具有不同强度的偏振光在光纤中传输时, 由于非线性作用和偏振控制器的调节, 它们到达起偏器时会产生一定的相位差, 总的相位差可近似表示为

$$\Delta\phi = \frac{2n\pi L}{\lambda} + \Delta\varphi_{\text{NL}}, \quad (1)$$

其中  $\lambda$  为光波在真空中的波长,  $L$  为环形腔长度,  $n$  为光纤介质的折射率,  $\Delta\varphi_{\text{NL}}$  为非线性相移。这样, 透过起偏器(为了达到最好的脉冲整形效果假设起偏器方向和经过偏振控制器后的光波的偏振方向正交)后的总光强<sup>[13]</sup>

$$P_t = P_0 \sin^2 \frac{\Delta\phi}{2} \sin^2 2\theta, \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式可得

$$P_t = P_0 \sin^2 \left( \frac{n\pi L}{\lambda} + \frac{\Delta\varphi_{\text{NL}}}{2} \right) \sin^2 2\theta. \quad (3)$$

从(3)式可看出, 通过起偏器的光波不仅与光波强度有关, 而且与偏振角  $\theta$  有关。调节偏振控制器(改变偏振角  $\theta$ ), 使同一波长的脉冲不同部分(中心与两翼)具有不同的透射率从而实现非线性偏振旋转锁模。另外, 从公式(3)可清晰地看到, 不同波长光波的透射率也可以通过调节偏振控制器而改变。设不同波长的光波透射率为  $T(\lambda)$ , 依据激光器自激振荡理论, 激光器谐振特性与增益特性应满足<sup>[14]</sup>

$$T(\lambda) \exp[G(\lambda)L_g] T_{\text{eff}} = 1, \quad (4)$$

$G(\lambda)$  代表波长为  $\lambda$  的光波增益系数,  $L_g$  为增益介质长度,  $T_{\text{eff}}$  为腔体线性损耗。(4)式表明, 激光器输出中心波长主要取决于腔内偏振相关光隔离器透射谱特性, 一般情况下, 为偏振相关光隔离器透射峰所对应的波长。从前面的分析可知, 调节偏振控制器不仅会影响通过起偏器的总光强, 而且还会改变其透射峰值的中心波长。因此, 通过细致调节偏振控制器可以实现光纤激光器输出中心波长的调谐。与腔内使用可调谐滤波器的方法<sup>[11]</sup>相比, 这种偏振调谐的方法具有插入损耗小、成本低、调谐范围大等优点。

### 3 实验结果和分析

实验过程中,当由高掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤及其他全光纤器件构成的环形腔耦合进 976 nm 抽运光后,仔细调节线偏振控制器,很容易在光谱分析仪中观察到稳定的窄带光谱,并在示波器上明显看到稳定的锁模脉冲序列。光纤激光器自起振锁模阈值抽运功率约为 13 mW。实验中在不改变偏振控制器角度的情况下逐渐增加抽运功率,发现随着抽运功率的增加光谱宽度有展宽现象,然而现象并不十分明显,当抽运功率为 45 mW 或者更高时,谱宽不会超过

0.64 nm。图 2 给出了抽运功率为 50 mW 时由 Anritsu MS9710C 光谱分析仪、Tektronix 示波器、FR-103XL 自相关仪所测得的输出脉冲的光谱、重复率、脉冲宽度。其中心波长为 1572.24 nm,谱宽 0.64 nm,重复频率为 10.23 MHz,考虑输出脉冲为双曲正割型,此时得到的脉宽为 4.23 ps。从图中可发现光谱十分对称,并且在长达 5 个小时的观测中,中心波长及谱线宽度没有发生任何漂移,同时示波器上的脉冲序列也很稳定。

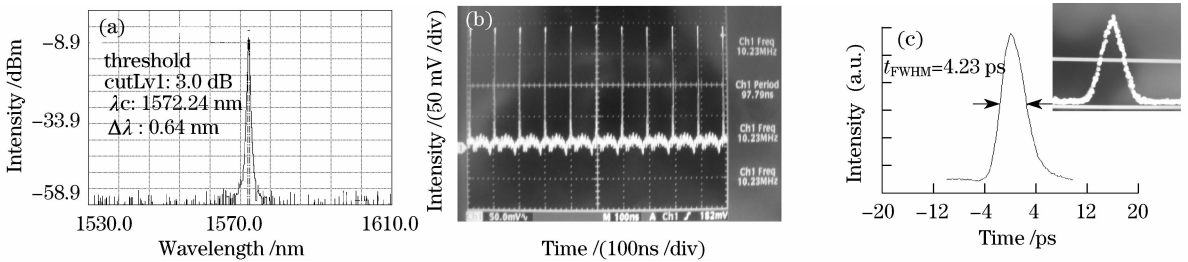


图 2 抽运功率为 50 mW 时得到的锁模脉冲结果。(a)锁模脉冲光谱图 (b)脉冲序列 (c)锁模脉冲自相关曲线

Fig. 2 Output results of mode-locked pulse train with 50 mW pump power.

(a) Spectrum of mode-locked pulse, (b) pulse train, (c) autocorrelation of pulse

实验中使用工作波长在  $1550 \pm 50$  nm 的宽带耦合器作为输出耦合器,在激光腔内不加其它任何调谐滤波器的情况下,实现了很宽范围波长连续可调谐的锁模脉冲激光输出。在保持抽运功率 50 mW 不变的情况下,耐心细致地调节两个在线偏振控制器的角度,可以改变输出脉冲的中心波长,如图 3 所示,其输出激光波长在 1548.64~1600.24 nm 内连续可调,3 dB 带宽在 0.48~0.64 nm 之间变化。

终大于 -6.86 dBm,边模抑制比都大于 44 dB。很明显,在 1565~1585 nm 之间激光输出功率比两边较高,说明在此波长范围内偏振相关损耗较小,这与整个激光腔内各器件的参数有关。相比单偏振控制结构的激光器<sup>[14]</sup>,此激光器边模抑制比有很大的提高,说明对于偏振相关光隔离器而言,双偏振控制器可以有效地提高它的滤波精细度。

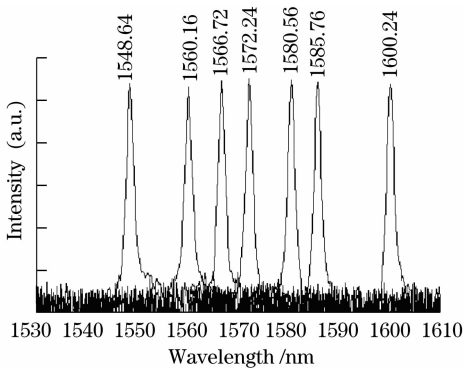


图 3 连续调谐输出光谱图

Fig. 3 Optical spectra of continuous tuning output

在波长调谐过程中观察激光器输出功率和边模抑制比(SMSR)的变化可以得到如图 4 所示结果,其中在 1572.24 nm 处得到最大输出功率 -4.97 dBm,在 1566.72 nm 处得到最大边模抑制比 47.51 dB。在整个波长调谐范围内,输出功率始

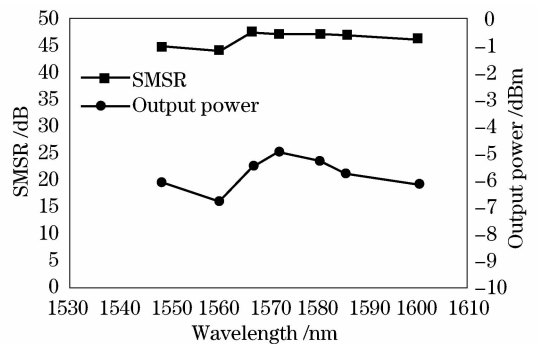


图 4 波长调谐范围内激光器输出功率和边模抑制比的变化

Fig. 4 Output power and side-mode suppression ratio (SMSR) over the wavelength tuning range of laser

与其它调谐光纤激光器相比,此激光器为全光纤结构,不会引入像 F-P 标准具、声光调谐滤波器等调谐器件与光纤之间的耦合损耗。因此,该光纤激光器可以实现低阈值自起振锁模,且受外界环境影响不大。在激光器实现自起振后,减少抽运功率,锁模脉冲不消失,直到降至 9 mW 前,激光器都能保

持基阶锁模运转状态。产生这种锁模运转回滞现象<sup>[15]</sup>主要是由于处于锁模状态下的脉冲峰值功率很高,虽然抽运功率有所下降,但仍可以维持非线性偏振旋转效应产生较强的自幅度调制作用。进一步降低抽运功率,使其低于 9 mW,锁模脉冲消失,只能观测到微弱的连续波输出;如果再次将抽运功率升至 13 mW 时,激光器又可以从连续波状态自动地实现锁模运转。由此可见,增强抽运功率,使腔内连续波信号的功率增大,这样有利于被动锁模激光器自起振的速度加快。

## 4 结 论

对利用非线性偏振旋转效应获得被动锁模光纤激光器进行了理论和实验的研究,通过偏振控制实现波长可调谐。实验上获得了低阈值自起振,重复频率为 10.23 MHz,中心波长在 1548.64~1600.24 nm 内连续可调,输出功率大于 -6.86 dBm,边模抑制比大于 44 dB 的超短脉冲输出。此可调谐环形腔掺 Er<sup>3+</sup> 光纤激光器结构简单,容易操作,输出超短脉冲稳定性好,边模抑制比高,在光纤通信和光纤传感方面有很好的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 H. A. Haus, E. P. Ippen, K. Tamura. Additive-Pulse modelocking in fiber lasers [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(1): 200~208
- 2 Axel Ruehl, Holger Hundertmark, Dieter Wandt *et al.*. 0.7 W all-fiber erbium oscillator generating 64fs wave breaking-free pulses [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(46): 6305~6309
- 3 J. Wu, D. Y. Tang, L. M. Zhao *et al.*. Soliton polarization dynamics in fiber lasers passively mode-locked by the nonlinear polarization rotation technique [J]. *Phys. Rev. E*, 2006, **74**(4): 046605
- 4 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**(11):2003~2007
- 5 D. U. Noske, J. R. Taylor. Spectral and temporal stabilization of a diode-pumped ytterbium-erbium fibre soliton laser [J]. *IEEE Electron. Lett.*, 1993, **29**(25): 2200~2202
  - 6 Tamura K, Kimura Y, Nakazawa M. Femtosecond pulse generation over 82 nm wavelength span from passively mode-locked erbium-doped fibre laser [J]. *IEEE Electron. Lett.*, 1995, **31**(13): 1064~1066
  - 7 Jeon M Y, Lee H K, Ahn J T *et al.*. Wideband wavelength tunable mode-locked fibre laser over 1557-1607 nm [J]. *IEEE Electron. Lett.*, 2000, **36**(4): 300~302
  - 8 Yang Shiquan, Zhao Chunliu, Yuan Shuzhong *et al.*. Wavelength tunable linear cavity erbium-doped fiber laser operating in L-band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 706~708
  - 9 杨石泉,赵春柳,袁树忠等.L波段线型腔波长可调谐掺铒光纤激光器[J].*光学学报*,2002,**22**(6):706~708
  - 9 Wang Zhaoying, Wang Yongqiang, Lin Ran *et al.*. Widely tunable self-starting passively mode-locked Er-doped fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 905~907
  - 王肇颖,王永强,林冉等.宽可调谐自起振被动锁模掺铒光纤激光器[J].*光子学报*,2004,**33**(8):905~907
  - 10 He Hucheng, Yang Lingzhen, Wang Yuncai. C-Band wavelength tunable erbium doped fiber laser with polarization control [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1597~1600
  - 贺虎成,杨玲珍,王云才.偏振控制C波段波长可调谐掺铒光纤激光器[J].*中国激光*,2006,**33**(12):1597~1600
  - 11 Zhang Yan, Chen Wei, Ren Min *et al.*. Stable, Tunable single-longitudinal-mode erbium-doped fiber laser with multiple ring cavities [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 507~511
  - 张艳,陈伟,任民等.稳定可调谐的单纵模多环形腔掺铒光纤激光器[J].*光学学报*,2008,**28**(3):507~511
  - 12 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
  - 宋方,徐文成,陈伟成等.78飞秒的被动锁模掺Er<sup>3+</sup>光纤激光器[J].*中国激光*,2007,**34**(9):1174~1177
  - 13 M. Horowitz, Y. Barad, Y. Silberberg. Noiselike pulses with a broadband spectrum generated from an erbium-doped fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(11): 799~781
  - 14 Ghera U, Konforti N, Tur M. Wavelength tunability in a Nd-doped fiber laser with an intracavity polarizer [J]. *IEEE Photon Technol. Lett.*, 1992, **4**(1): 4~6
  - 15 Komarov A, Leblond H, Sanchez F. Multistability and hysteresis phenomena in passively mode-locked fiber lasers [J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **71**: 053809