

# 非线性放大环形镜“8”字腔光纤激光器实验研究\*

张 伟<sup>1,2</sup> 陈国夫<sup>1</sup> 赵 卫<sup>1</sup> 王屹山<sup>1</sup> 李 喆<sup>1,2</sup> 侯 洵<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 710068)

(2 中国科学院研究生院,北京 100039)

**摘 要** 使用 976 nm 半导体激光器作为抽运源,对利用非线性放大环形镜(NALM)锁模运行的掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器进行了实验研究,获得了脉冲宽度 43.6 ps,中心波长为 1053.3 nm 的锁模脉冲激光输出,光谱宽度 8 nm,输出功率为 0.2 mW,重复频率为 18.2 MHz,经过放大,通过光栅对腔外色散补偿,在腔外产生了宽度 616 fs 的脉冲激光。

**关键词** 激光技术;光纤激光器;被动锁模;非线性放大环形镜(NALM);“8”字形腔;掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A

## 0 引言

随着光通信技术的发展,掺 Er<sup>3+</sup> 光纤激光器得到了深入而广泛的研究<sup>[1~3]</sup>,较之用于通信波段的掺 Er<sup>3+</sup> 光纤激光器,Yb<sup>3+</sup> 因其具有很宽的吸收谱(800 nm~1064 nm)和发射谱(975 nm~1200 nm),没有激发态吸收,其增益带宽可支持小于 30 fs 的变换极限脉冲<sup>[4]</sup>,也日益受到了人们的重视。

在掺镱超短脉冲激光领域,以非线性偏振旋转(NPE)相加锁模为基础的环形腔和 Fabry-Perot 线形腔的研究最多<sup>[5~9]</sup>,用半导体可饱和吸收镜作为锁模器件的 Fabry-Perot 线形腔超短脉冲激光器和环形腔超短脉冲光纤激光器已经商品化。对环形腔,无论在超短脉冲获得,还是单脉冲能量、重复频率上都获得了长足的进步。36 fs<sup>[9]</sup>、14 nJ<sup>[10]</sup>、200 MHz<sup>[11]</sup> 的锁模脉冲已经获得,而基于 Sagnac 环(包括非线性光学环形镜(NOLM)以及非线性放大环形镜(NALM))的“8”字形腔掺镱超短脉冲光纤激光器却很少有报道<sup>[12~14]</sup>。在 NOLM 形激光器中,其中央耦合器为非 3 dB 耦合器,且增益光纤位于线性环内,而 NALM 形激光器中,其中央耦合器可以为 3 dB 耦合器,增益光纤位于非线性环内,相比与 NOLM, NALM 具有开关阈值低、对比度高、以及非线性环所用光纤较短等优点。2002 年 12 月,Avdokhin. A. V. 等人在 NALM“8”字形腔掺镱锁模脉冲光纤激光器中,利用空心光纤在非线性环内进行色散补偿实现了 850 fs,中心波长 1065 nm 输出<sup>[12]</sup>。2006 年本课题组赵卫等人在基于 NOLM“8”字形腔掺镱锁模脉冲光纤激光器中利于光栅对在线性环内进行色散补偿获得了脉宽为 207 fs,中

心波长为 1036 nm 的锁模脉冲输出。这是目前基于非线性光学环形镜“8”字形腔掺镱锁模脉冲光纤激光器所得到的最短的脉冲输出<sup>[14]</sup>。

在 Avdokhin. A. V.<sup>[12]</sup>、赵卫<sup>[13]</sup> 等人的实验中,均属于采用腔内色散补偿的超短脉冲光纤激光器,对于腔内色散补偿的超短脉冲光纤激光器,振荡器可直接输出亚皮秒的脉冲。采用腔外补偿的超短脉冲激光器,不仅可输出几十到几百皮秒的超短脉冲,而且还可以同时输出亚皮秒的超短脉冲。本文对在腔内没有任何色散补偿、基于 NALM 的“8”字形腔掺镱光纤激光器进行了实验研究,通过光栅对进行腔外色散补偿,得到了亚皮秒超短脉冲输出,其中心波长为 1053.3 nm、输出功率为 1.6 mW、脉冲宽度为 616 fs。

## 1 实验装置及原理

由于 976 nm 波长是掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤最大吸收截面所对应的波长,所以实验采用了输出波长为 976 nm 尾纤输出的半导体激光器。为了避免温度变化引起输出波长漂移而导致泵浦效率的下降,光源中加有光纤布拉格光栅(FBG)以稳定输出波长。整个“8”字形光纤激光器的实验装置图如图 1,它由一个非线性放大环形镜(NALM)和一个线性环组成。NALM 由一个 2×2 端口的的光纤耦合器 coupler1,980/1053 波分复用器,掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤以及普通光纤(Lucent 980 fiber)组成。采用 Lucent 980 光纤是因为其模场直径相对较小,可使在有限的泵浦功率下,NALM 中相对传输的两束光获得足够的非线性相移。线性环由输出耦 coupler2(输出耦合比为 1:99),以及中心波长为 1053 nm 的偏振无关光隔离器组成。偏振无关光隔离器(Isolator)的作用是为抑制 NALM 的反射光,并保证光在线性环中单向运行。图中 PC1 和 PC2 为在线型偏振控制器,

\* 国家自然科学基金(60537060)资助

Tel:029-88887603 Email:wyx27210@163.com

收稿日期:2006-04-29

用来调节光纤内传输光的偏振态, 调节它可使激光器稳定锁模. 图中色散延迟线 DDL 由两块平面反射光栅组成(1740gr/mm), 结构如图 2, 用来补偿正色散以得到超短脉冲输出.

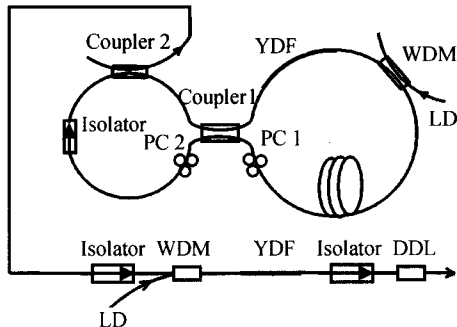


图 1 实验装置图  
Fig. 1 Experimental setup

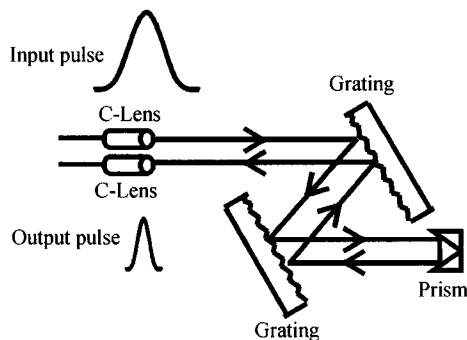


图 2 色散延迟线系统  
Fig. 2 DDL system

“8”字形腔锁模脉冲激光器的锁模方式是一种基于类可饱和吸收体的被动锁模方式, 激光器是由左边的线性环和右边的非线性环 NALM 构成, 非线性环 NALM 实际上就是一个 Sagnac 干涉仪. 首先, 信号光从 NALM 的下端口进入线性环, 经过一次腔内运转后从输出端口输出. 其次, 输入非线性环的光经过 NALM 的上端口进入非线性环, 并被分成幅值相等、传播方向相反的两束光, 这两路光光程相同并在 coupler1 处干涉. 由于提供放大的  $\text{Yb}^{3+}$  光纤靠近中央耦合器, 因此, 一路光刚进入环路即被放大, 而另一路光则是先经过一段较长的单模光纤, 而在离开环路时被放大. 这样沿顺时针方向传输的光和沿逆时针方向传输的光将会由于自相位调制 (SPM)、交叉相位调制 (XPM) 效应而在 NALM 中获得不同的非线性相移, 然后经历了不同非线性相移的两路光在中央耦合器 coupler1 发生干涉. 由于 Sagnac 干涉仪的开关效应, 当其最终的相移差为  $\pi$  时, 脉冲被透射, 否则被反射. 又由于脉冲的中央部分强度高, 获得的相移大, 而脉冲的边缘部分强度弱, 获得的相移小, 从而使得脉冲强度大的最先达到透射阈值被透射而脉冲的边缘部分未达到透射阈值而被反射. 这样 NALM 就相当

于一个高通滤波器, 与可饱和吸收体的功能相似. 本实验所做的掺  $\text{Yb}^{3+}$  “8”字形光纤激光器就是基于 NALM 类快速可饱和吸收体被动锁模的一种光纤激光器.

## 2 实验结果以及讨论

对  $\text{Yb}^{3+}$ , 1036 nm 处发射截面最大, 而 1053 nm 处的相对较小 (约为 1036 nm 处的 1/3), 不易实现激光输出. 利用图 1 的“8”字形腔结构, 仔细熔接好光路, 采用不同长度的掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤, 并对 NALM 进行优化. 在兼顾锁模状态的情况下, 仔细调节偏振控制器 PC1 和 PC2 以调节损耗, 最终利用了 0.5 m 掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤, 获得了稳定的锁模脉冲. 在此状态下, 激光谐振腔的输出情况如下: 光谱半高全宽 (FWHM) 约为 8 nm, 输出功率 0.2 mW, 重复频率 18.2 MHz.

由于振荡器输出耦合比很小, 导致了输出功率很小, 同时由于光栅对的损耗很大, 直接压缩后会导致  $\mu\text{W}$  量级的输出. 为了增加输出功率, 对输出光进行了放大, 放大器的实验结构如图 1. 输出脉冲经过隔离器由 980/1053 nm WDM 耦合进 1 m 的掺钇光纤放大, 当放大器泵浦功率在 100 mW 得到了 6.2 mW (由美国相干公司 Fieldmaster 型功率计测得) 的激光输出, 相应的光谱 (由 Ocean optics SD2000

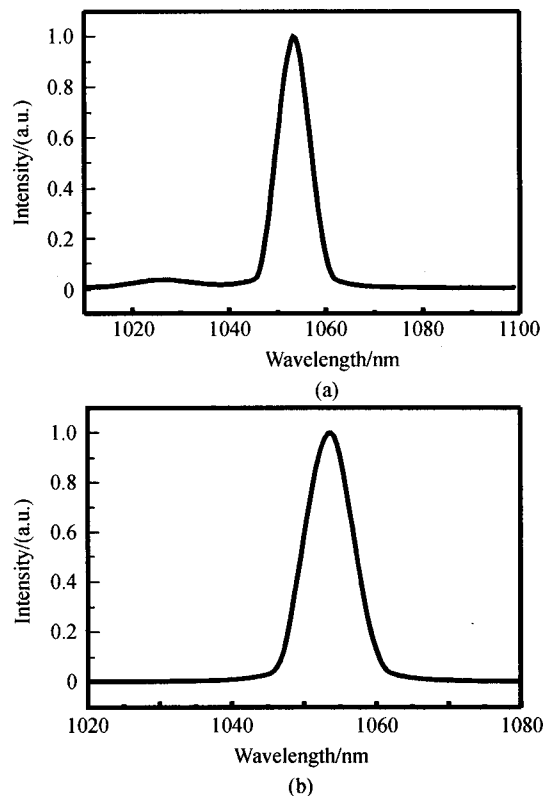


图 3 振荡器输出光谱(a)和放大器输出光谱(b)  
Fig. 3 The output spectrum of the oscillator(a) and the amplifier(b)

光纤光谱仪测得)如图3(a),右边的小包代表了 ASE 光,经过压缩器后,输出功率为 1.6 mW. 典型的光谱如图3(b).由图可见,光谱宽度约为 8 nm,中心波长为 1053.3 nm. 光谱带宽很窄的原因可解释如下:由于 NALM 在本腔形中类可饱和吸收体的作用对脉宽有一个窄化的作用,从而影响到整个输出脉冲的形状,当输出脉冲的前后沿的斜率很小时,再加之整个激光腔内的峰值功率不高,由  $\Delta\omega = -n_2 dI/dt$  可看出起主导作用的由自相位调制所引起的新的频率相对减小,因此使得整个激光器的光谱带宽比较窄.

用 APE pulsecheck 自相关仪所测得的输出脉冲宽度为 43.6 ps(假定脉冲形状为 Lorentz 形),如图4(a).脉宽较宽主要是由于激光振荡器中的色散量一直为正(群速度色散产生的啁啾为正,自相位调制产生的啁啾也为正),光脉冲在腔内一直被展宽,而激光腔内没有任何色散补偿所导致.实验中,采用双通结构用光栅对进行腔外脉冲压缩,而在 Avdokhin . A. V<sup>[12]</sup> 的实验中,其采用空心光纤对 NALM 腔内“8”字形腔掺镜锁模脉冲光纤激光器进行腔内色散补偿,得到了 850 fs 的锁模脉冲输出.对空心光纤而言,其一经截短很难再次利用而且价格昂贵,相比于光栅对压缩器,其可重复利用性以及

色散的补偿可调节性均差于光栅对,实验中通过调节光栅(1740 gr/mm)对间的间距,最终在两光栅对间距为 3.1 cm 时,得到了脉宽为 616 fs 的压缩脉冲,如图4(b).光栅对压缩器的压缩因子为 70.8.文献[13]采用的 NOLM“8”字形腔结构,由于其并未进行压缩,且所用光纤长度很长,加之脉冲在腔内没有压缩,因此其振荡器脉冲宽度达到了 234 ps.

由  $\Delta\nu \cdot \Delta t = 0.142$  可知,8 nm 的光谱宽度可支持 65.6 fs 的光脉冲.实验中实际只得到 616 fs 的光脉冲,这主要是由于大刻线数光栅对单位距离上所能提供的色散量很大,使得色散补偿不好调节,同时一维平移台不够精密,再加之腔内光纤已被固定长度再无法变化以及光纤内的高阶非线性仅得到了 616 fs 的光脉冲.在实验中经常调到的脉宽为 1 ps ~ 10 ps.

### 3 结论

本文对在腔内没有任何色散补偿、基于 NALM 的“8”字形腔掺镜光纤激光器进行了实验研究.通过光栅对进行腔外色散补偿,得到了亚皮秒超短脉冲输出,其中心波长为 1053.3 nm、压缩后输出功率为 1.6 mW、脉冲宽度为 616 fs.由于实验中所用的光栅刻线过密,且所做的光纤激光器用的光纤过长,导致所得到的脉冲宽度相对较长.如果进一步的优化腔结构和选用合适的色散补偿器件可以得到更好的结果.此外,进一步的调节非线性和控制 GVD,也可得到更宽的光谱.

#### 参考文献:

- 1 Fermann M E, Andrejco M J, Silberberg Y, *et al.* Generation of pulse shorter than 200-fs from a passived mode-locked Er<sup>3+</sup> fiber laser. *Optics Letters*, 1993, **18** (1):48~50
- 2 Galvanauskas A, Fermann M E, Harter D. High power amplification of femtosecond optical pulse in a diode-pumped fiber system. *Optics Letters*, 1994, **19**(16):1201~1203
- 3 Lacot E, Stoecke F, Chenevier M. Dynamics of an erbium-doped fiber laser. *Physics Review(A)*, 1994, **49**(5):3997~4008
- 4 Lefort L, Price J H V, Richardson D J, *et al.* Practical low-noise stretched-pulse Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser. *Optics Letters*, 2002, **27**(5):291~293
- 5 Luis A Gomes, Lasse Orsila, Tomi Jouhti, *et al.* Picosecond SESAM-based ytterbium mode-locked fiber lasers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, **10**(1):129~136
- 6 杨玲珍,陈国夫,王屹山,等.掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤环形激光器研究. *光子学报*, 2004, **33**(3):261~263

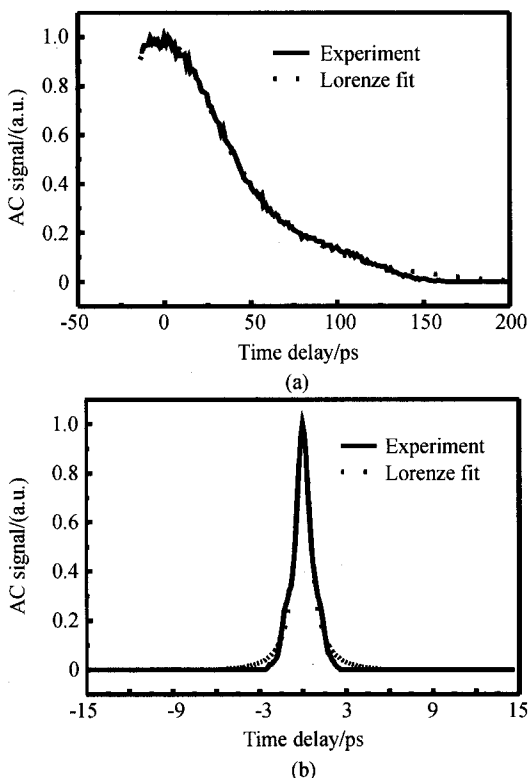


图4 振荡器输出脉冲自相关迹(a)及压缩后输出脉冲自相关迹(b)

Fig. 4 Autocorrelation trace of the mode-locking pulses produced by the oscillator(a) and the compressor(b)

- Yang L Z, Cheng G F, Wang Y S, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3):261~263
- 7 林浩佳, 阮双琛, 程超, 等. 掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层大模面积光子晶体光纤激光器的研究, *光子学报*, 2004, **33**(7):707~799
- Lin H J, Ruan S C, Chen C, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7):707~799
- 8 阮双琛, 杨兵, 朱春艳, 等. 2.2 W 掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光子晶体光纤激光器. *光子学报*, 2004, **33**(1):15~16
- Ruan S C, Yang B, Zhu C Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1):15~16
- 9 Ilday F O, Buckley J R, Kuznetsova L, *et al.* Generation of 36-femtosecond pulses from a ytterbium fiber laser. *Optics Express*, 2003, **11**(26):3550~3554
- 10 Buckley J R, Wise F W, Ilday F O, *et al.* Femtosecond fiber lasers with pulse energies above 10 nJ, *Optics Letter*, 2005, **30**(14):1887~1890
- 11 Ilday F O, Chen J, Kartner F K. Generation of sub-100-fs pulses at up to 200MHz repetition rate from a passively mode-locked Yb-doped fiber laser. *Optics Express*, 2005, **13**(7):2716~2721
- 12 Avdokhin A V, Popov S V, Taylor J R. Totally fiber integrated, figure-of-eight, femtosecond source at 1065nm. *Optics Express*, 2003, **11**(3):265~230
- 13 马海全, 刘畅, 赵卫, 等. 8 字形腔锁模掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤激光器. *中国激光*, 2005, **32**(9):1173~1177
- Ma H Q, Liu C, Zhao W, *et al.* *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(9):1173~1177
- 14 Zhao Wei, Zhang Wei, Ma Haiquan, *et al.* Generation of 207 fs pulses from a figure-of-eight cavity passively mode-locked ytterbium fiber laser. *Chinese Physics* (to published)

## Experimental Study of Figure-of-eight Fiber Lasers Based on Nonlinear Amplifying Loop Mirror

Zhang Wei<sup>1,2</sup>, Chen Guofu<sup>1</sup>, Zhao Wei<sup>1</sup>, Wang Yishan<sup>1</sup>, Li Zhe<sup>1,2</sup>, Hou Xun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

<sup>2</sup> Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039

Received date:2006-04-29

**Abstract** The experimental study of the  $\text{Yb}^{3+}$ -doped figure-of-eight cavity fiber laser using the nonlinear amplifying loop mirror (NALM) was reported, which was pumped by 976 nm semiconductor laser. The fiber laser can generate 0.2 mW average power of 43.6 ps pulse duration at a repetition of 18.2 MHz, and operating central wavelength was 1053.3 nm, spectrum width was 8 nm, though grating pairs to compensate the positive dispersion outside the cavity, as short as 616 fs output pulse was obtained after amplifying, which was to our knowledge the shortest pulse to date from this kind of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped fiber laser.

**Keywords** Laser technique; Fiber lasers; Passive mode-locked; Figure-of-eight cavity; Nonlinear amplifying loop mirror;  $\text{Yb}^{3+}$ -doped fiber



**Zhang Wei** was born in Shaanxi, China. He received the B. S. degree and M. S. degree successively from Northwest University. Now, he is studying for his Doctor degree in State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His research interests are fiber laser generation and amplifier as well as nonlinear fiber optics.