

高消光比掺 Yb³⁺ 锁模脉冲光纤激光器研究*

张伟^{1,2}, 李喆^{1,2}, 陈国夫¹, 赵卫¹, 王屹山¹, 侯洵¹

(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 100039)

摘 要:报道了使用 976 nm 半导体激光器作为抽运源, 利用非线性放大环形镜(NALM)锁模运行的掺 Yb³⁺ 光纤激光器的实验研究. 采用偏振相关隔离器代替偏振无关光隔离器、保偏光纤耦合器代替普通单模光纤耦合器, 得到了高消光比的锁模脉冲输出, 重复频率 13.46 MHz, 光谱宽度约 2 nm, 消光比高于 25 dB.

关键词:激光技术; 光纤激光器; 锁模; “8”字腔; 消光比

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2008)07-1297-4

0 引言

光纤激光器以其能量转化效率高、结构紧凑、可靠性高等优点, 在超快光学、医疗、工业加工、光信息处理、激光制导、惯性约束快点火等领域获得了越来越多的应用. 各种腔型和结构^[1-5]的光纤激光器也已经出现, 但输出光基本是消光比很低的椭圆偏振光. 随着保偏光纤(Polarization Maintaining Fiber, PMF)以及保偏光纤器件的出现, 线偏振输出的光纤激光器也已经出现, 在连续激光输出方面, 2000年, 盛秋琴^[6]等人在环形腔光纤激光器中利用准光纤偏振器、偏振无关隔离器以及光纤光栅获得了线宽小于 0.01 nm, 消光比大于 18 dB 的连续激光输出; 2004年, Wang An-ting^[7]等人采用自注入锁定(self injection locking)获得了单频、单偏振(single-polarization)的激光输出; 在线偏振锁模脉冲激光输出方面, 2006年, Nicholson J W^[8]等人在全保偏光纤“8”字腔光纤激光器中获得了脉宽为 427 fs 的锁模脉冲输出, 激光器的锁模依靠保偏振幅调制器; 2005年, Nielsen C K^[9]等人在全保偏光纤线性腔光纤激光器中依靠可饱和吸收镜获得了 280 fs、1 nJ 的锁模脉冲输出, 这是目前全保偏掺镱锁模脉冲光纤激光器获得脉冲最短的实验结果.

在上述盛秋琴^[6]、Wang An-ting^[7]等人的工作中, 得到的均为连续激光输出. 在 Nicholson J W^[8]、Nielsen C K^[9]的工作中, 虽得到了锁模脉冲输出, 但腔内所用光纤均为保偏光纤. 相比于普通单模光纤, 保偏光纤价格昂贵, 而且很难熔接. 本文采用偏振相关隔离器替代偏振无关光隔离器, 采用保偏光

纤耦合器替代普通单模光纤耦合器, 仅在腔内使用部分保偏光纤, 在非线性放大环形镜(NALM)型“8”字形腔锁模脉冲激光器中获得了高消光比的锁模脉冲激光输出, 重复频率为 13.46 MHz, 消光比高于 25 dB. 在所测得的两个锁模状态下, 功率分别为 1.87 mW(中心波长 1057 nm)和 1.93 mW(中心波长 1 043 nm), 光谱宽度约 2 nm.

1 实验装置及原理

整个“8”字形光纤激光器的实验装置如图 1. 泵浦源采用 976 nm LD 抽运光源(单模光纤输出, 最大输出功率为 500 mW), 整个实验装置由一个非线性放大环形镜(NALM)和一个线性环组成. 非线性环由一个 2×2 端口的普通单模光纤耦合器 Coupler1, 980/1 053 波分复用器, 掺 Yb³⁺ 光纤以及普通光纤(Lucent 980 fiber, 图中实线部分)组成. 其中掺 Yb³⁺ 光纤被非对称地放置于 NALM 中, 采用 Lucent 980 光纤是因为其模场直径相对较小, 可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. 线性环由保偏光纤耦合器 Coupler 2(输出耦合比为 5:99)以及运行波长为 1 053 nm 的偏振相关光隔离器(PMI)(保偏光纤用虚线表示)组成. 偏振相关光隔离器可以抑制 NALM 的反射光, 保证光在线性环中的单向运行并达到起偏作用. 图中 PC1 和 PC2 为在线型偏振控制

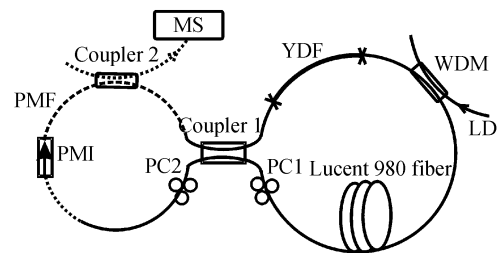


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

* 国家自然科学基金(60537060)资助

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

收稿日期: 2007-01-11

器,均装在普通光纤上,用来调节光纤内传输光的偏振态,以便使激光器稳定锁模. MS为消光比测试系统.

“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,基本思想是利用非线性器件对输入脉冲的强度依赖性而得到相较输入脉冲更窄的脉冲. 本实验中所采用的强度依赖性非线性器件为 NALM, 输入光经过 Coupler 1 耦合器被分成幅值相等、传播方向相反的两路光,由于掺 Yb^{3+} 光纤在 NALM 中的非对称放置,使得一路光刚进入环路即被放大,然后经过一段较长的单模光纤,获得较大的相移. 另一路光则是先经过一段较长的单模光纤,然后在离开环路时被放大而获得较小的相移,然后这两路光在中央耦合器 Coupler 1 干涉. 基于 Sagnac 环的开关效应,当两列脉冲相差为 π 时,脉冲被透射,否则被反射. 又由于脉冲的峰值部分强度高,获得的相移大,而脉冲的边缘部分强度弱,获得的相移小,因而脉冲峰值部分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. 非线性放大环形镜的这种性能与可饱和吸收体的功能相似. “8”字形锁模脉冲光纤激光器就是基于 NALM 的脉冲加成机制激光器. 在一般的“8”字形腔锁模脉冲光纤激光器中,所用隔离器为偏振不敏感隔离器,所用输出耦合器为普通单模光纤耦合器. 本实验采用偏振相关隔离器(所带的尾纤为保偏光纤,器件最小消光比 25 dB)替代偏振无关隔离器(所带尾纤为普通光纤),保偏光纤耦合器(所带的尾纤为保偏光纤)替代普通单模光纤耦合器,由于“8”字形腔结构锁模并不是基于偏振的锁模方式,因此做上述的器件代换并不会影响该“8”字形光纤激光器的锁模. 偏振相关光隔离器的作用是抑制 NALM 的反射光,保证光在线性环中的单向运行,同时达到一个起偏的作用. 光路中光经过偏振相关隔离器变为线偏振光,此线偏振光再经过保偏光纤耦合器从而输出高消光比的锁模脉冲激光.

2 消光比的测试装置及方法

消光比测试装置如图 2. 它由显微物镜(Objective),渥拉斯顿棱镜(Wollaston),功率计(Power meter)组成. 激光器的输出端置于光纤调整架,令光的出射点位于显微物镜的焦点. 光经显微物镜后被准直,然后入射到渥拉斯顿棱镜(放置于带刻度的偏光镜架上)上,在渥拉斯顿棱镜后放置功率计测量功率. 实验中,由于激光器所输出的光具有很高的消光比,因此,当激光器的出射光经显微物镜准直入射到渥拉斯顿棱镜上时,通过旋转渥拉斯顿棱镜,

可以得到强弱不断变化的两个光点. 由渥拉斯顿的特性可知,当入射于渥拉斯顿棱镜上光的振动方向垂直于或平行于棱镜 ABD 的光轴方向时,从渥拉斯顿棱镜出射的两个光点将有一个强度最大,而另一个强度最小,测量这两个点的光强,通过计算 $-10\log_{10} P_{\min}/P_{\max}$ 就可以得到激光器输出激光的消光比. 通过检偏器就可以确定输出光的振动方向.

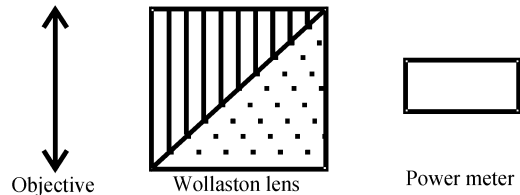


图 2 消光比测试装置

Fig. 2 MS

3 实验结果和讨论

实验中使用保偏光纤熔接机(FSM-50PM)将偏振敏感光隔离器和保偏耦合器仔细熔接,以保证光的消光比不被降低,同时尽量减小熔接损耗. 最后采用 1 m 长掺 Yb^{3+} 光纤,通过调节偏振控制器 PC 1, PC 2, 获得了稳定的锁模脉冲输出,激光器重复频率为: 13.46 MHz, 单个脉冲如图 3 (Tektronix485 测得), 清晰的实脉冲顶点说明锁模状态很好.

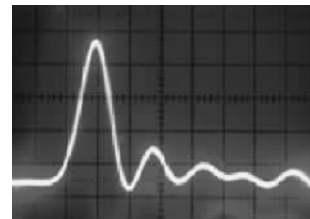
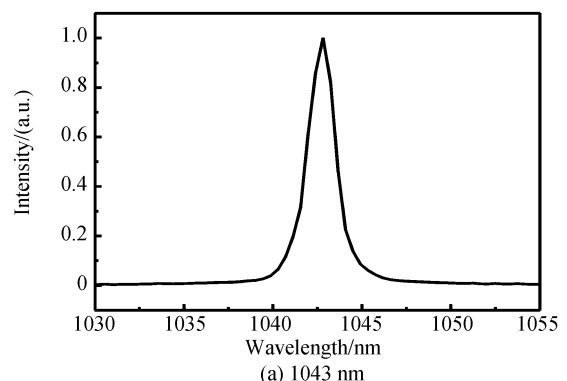


图 3 单个脉冲图

Fig. 3 Single pulse trace

调节偏振控制器 PC 1 和 PC 2, 获得了锁模中心波长分别位于 1 043 nm, 1 057 nm 的锁模脉冲, 测得中心波长为 1 043 nm 时, 输出功率为 1.93 mW (Fieldmaster 型功率计测得), 中心波长为 1 057 nm 时, 输出功率为 1.87 mW, 光谱如图 4, 光谱宽度约 2 nm.



(a) 1043 nm

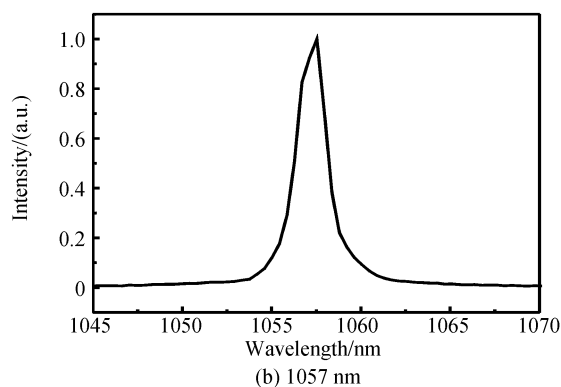


图4 振荡器输出光谱

Fig. 4 The output spectrum of the oscillator

中心波长为 1057 nm 时,用 APE Pulse Check 自相关仪测得的脉冲自相关迹如图 5. 在假定输出为高斯脉冲的情况下,脉冲宽度为 108.8 ps. 从图中可见,此种激光器脉冲自相关迹光滑且没有底座,极易进行下一步放大、压缩实验.

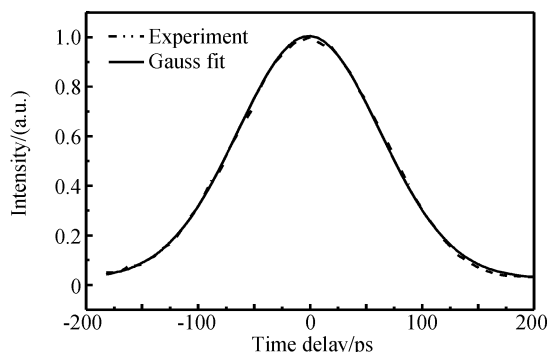


图5 输出脉冲的自相关迹

Fig. 5 Autocorrelation of output pulse

测消光比时,将保偏光纤耦合器的输出端固定,置于光纤调整架上.光从光纤的出射点位于显微物镜的焦点,光经显微物镜后被准之,准直光打在渥拉斯顿棱镜上,可看到光经棱镜后成为两个光点.旋转渥拉斯顿棱镜,当两个光点一个光强最大,一个最弱时,记下此时两个光点的功率,算出消光比,并相应记下此时渥拉斯顿棱镜的旋转角度(设此时角度为 0°).对渥拉斯顿棱镜,当入射光的振动方向平行或垂直于第一块棱镜时,均可得到最大光强和最小光强(弱光由 coherent LM-2-Vi 探头直接测,强光衰减后测),因此渥拉斯顿棱镜旋转一周可测到四次最大和最小,相应的可算出四次消光比.测量时发现,旋转渥拉斯顿棱镜,用红外检测片可看到棱镜后的两个光点强度由弱到强不断地变化,中心波长在 1 043 nm 时测得消光比为 26.4 dB,中心波长在 1 057 nm 时,消光比为 25.3 dB.可见,对每一个锁模状态均得到了线偏振的锁模脉冲输出,消光比优于 25 dB.实验中,两个锁模状态的消光比有些差异,这是因为对于不同的中心波长,偏振相关隔离器的消光比会有些不同.此外,测量功率时人为的误差

也会导致一定差异.输出激光的消光比取决于偏振相关光隔离器的消光比以及保偏光纤耦合器和偏振相关光隔离器连接时保偏光纤轴的对准程度.偏振相关光隔离器的消光比越高,保偏光纤和保偏光纤熔接的越好,消光比就会越高.基于“8”字形腔锁模原理,相信在非线形光学环形镜(NOLM)型“8”字形腔超短脉冲光纤激光器采用同样的替代,也可得到高消光比的锁模脉冲激光输出.

4 结论

本文采用偏振相关隔离器代替偏振无关光隔离器,保偏光纤耦合器代替普通单模光纤耦合器,仅在腔内使用部分保偏光纤,在非线形放大环形镜(NALM)型的“8”字形腔锁模脉冲激光器中获得了高消光比的锁模脉冲激光输出,脉冲宽度为 108.8 ps,重复频率 13.46 MHz,消光比高于 25 dB.输出激光的消光比取决于偏振敏感光隔离器的消光比以及保偏光纤耦合器和偏振敏感光隔离器连接时保偏光纤轴的对准程度.相信,在非线形光学环形镜(NOLM)型“8”字形腔超短脉冲光纤激光器采用同样的替代也可得到高消光比的锁模脉冲激光输出.

参考文献

- [1] GOMES L A, ORSILA L, JOUHTI T, *et al.* Picosecond SESAM-based ytterbium mode-locked fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, **10** (1): 129-136.
- [2] YANG Ling-zhen, CHEN Guo-fu, WANG Yi-shan, *et al.* Yb³⁺-doped fiber ring laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 261-263.
杨玲珍,陈国夫,王屹山,等.掺 Yb³⁺ 光纤环形激光器研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(3): 261-263.
- [3] ZHANG Wei, CHEN Guo-fu, ZHAO Wei, *et al.* Experimental study of figure-of-eight fiber lasers based on nonlinear amplifying loop mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35** (12): 1808-1811.
张伟,陈国夫,赵卫,等.非线性放大环形镜“8”字形腔光纤激光器的实验研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(12): 1808-1811.
- [4] ZHAO De-shuang, LIU Yong-zhi, WANG Bing-zhong, *et al.* Tunable Er³⁺-doped fiber laser with narrow linewidth and high signal-to-noise ratio[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35** (4): 481-484.
赵德双,刘永智,王秉中,等.窄线宽高信噪比可调谐掺 Er³⁺ 光纤激光器[J]. *光子学报*, 2006, **35**(4): 481-484.
- [5] HUANG Zhi-jian, SUN Jun-qiang, HUNG De-xiu. Study on nonlinear amplifying compound loop mirror and passively mode locked Erbium-doped fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1998, **A25**(9): 774-780.
黄志坚,孙军强,黄德修.非线性放大复合环形镜及被动掺铒光纤激光器研究[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(9): 774-780.
- [6] SHENG Qiu-qin, DONG Xiao-yi, Lü Ke-cheng, *et al.* A narrow linewidth single polarized all fiber laser[J]. *Acta Scientiarum*

- Naturalium Universitatis Nankaiensis (Natural Science Edition)*, 2000, **33**(1):94-96.
- 盛秋琴,董孝义,吕可诚,等.窄线宽单偏振全光纤激光器[J].南开大学学报(自然科学),2000,**33**(1):94-96.
- [7] WANG An-ting, MING Hai, LI Feng, *et al.* Single-frequency, single-polarization ytterbium-doped fiber laser by self-injection locking[J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, **2**(4):223-225.
- [8] NICHOLSON J W, ANDREJCO M, A Polarization maintaining, dispersion managed, femtosecond figure-eight fiber laser[J]. *Opt Express*, 2006, **14**(8):8160-8167.
- [9] NIELSEN C K, ORTAC B, SCHREIBER T, *et al.* Self-starting self-similar all-polarization maintaining Yb-doped fiber laser [J]. *Opt Express*, 2005, **13**(23):9346-9351.

Study on High Extinction Ratio Ytterbium-doped Mode-locked Fiber Laser

ZHANG Wei^{1,2}, LI Zhe^{1,2}, CHEN Guo-fu¹, ZHAO Wei¹, WANG Yi-shan¹, HOU Xun¹

(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 Sciences, Beijing 100039, China)

Received date: 2007-01-11

Abstract: The experimental study of the Yb³⁺-doped fiber laser using the nonlinear amplified loop mirror (NALM) is reported, which is pumped by 976 nm semiconductor laser. Using polarization dependent isolator and polarization maintaining coupler instead of polarization independent isolator and single mode coupler, high extinction ratio mode-locked pulse train are achieved, the repetition rate is 13.46 MHz, the width of the spectrum is about 2 nm and the extinction ratio is higher than 25 dB.

Key words: Laser technology; Fiber lasers; Mode-locked; Figure-of-eight laser (F8L) cavity; Extinction ratio



ZHANG Wei was born in Shaanxi. He received the B. S. degree and M. S. degree from Northwest University. Now, he is studying for his Ph. D. 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 generation and amplifier as well as nonlinear fiber optics.