

基于偏置相移非线性环路反射镜的锁模振荡放大 飞秒脉冲激光器

刘关玉¹, 欧尚明³, 陈昆仑², 苏 杭², 胡 亮², 李红波², 陈世豪²,
康兆伦², 刘党会², 陈 浩², 王爱民¹, 张志刚¹

¹北京大学信息科学技术学院, 北京 100871;

²温州医科大学附属眼视光医院, 浙江 温州 325027;

³华南师范大学信息光电子科技学院, 广东 广州 510631

摘要 设计了一种基于偏置相移非线性环路反射镜的全保偏锁模光纤激光器。搭建了全保偏锁模振荡器系统, 该系统通过二级掺镱光纤放大获得了平均功率为 2.4 W、重复频率为 20.3 MHz、脉冲宽度为 142 fs 的脉冲序列输出。由于振荡器采用全保偏光纤结构, 锁模具有良好的抗环境稳定性。

关键词 激光器; 保偏光纤; 锁模; 非线性环路反射镜

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0501011

Mode-Locked Oscillator-Amplifier Femtosecond Pulse Laser with Bias Phase Shift Nonlinear Loop Mirror

Liu Guanyu¹, Ou Shangming³, Chen Kunlun², Su Hang², Hu Liang², Li Hongbo²,
Chen Shihao², Kang Zhaolun², Liu Danghui², Chen Hao², Wang Aimin¹, Zhang Zhigang¹

¹School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China;

²The Eye Hospital of WMU Zhejiang Eye Hospital, Wenzhou, Zhejiang 325027, China;

³School of Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University,
Guangzhou, Guangdong 510631, China

Abstract An all polarization maintaining mode-locked fiber laser which is based on bias phase shift nonlinear loop mirror is proposed. An all polarization maintaining mode-locked oscillator system is set up. The system generates pulses with average power of 2.4 W, repetition rate of 20.3 MHz and pulse width of 142 fs by three stages Yb-doped fiber amplification. Since the oscillator adopts all polarization maintaining fiber structure, the mode locking is environmentally stable.

Key words lasers; polarization maintaining fiber; mode-locked; nonlinear loop mirror

OCIS codes 140.4050; 060.2420; 140.3460

1 引 言

近年来,飞秒脉冲光纤激光器以其小型化、效率高、价格低、对环境依赖性小等优点得到迅速发展,成为传统固体飞秒激光器的有力竞争对手。锁模光纤激光器脉冲超短、峰值功率高,在科学研究和工业加工中有着不可替代的应用价值。超短脉冲光纤激光器主要的三种锁模机制分别为利用非线性环路反射镜^[1]、可饱

收稿日期: 2016-11-10; 收到修改稿日期: 2016-12-13

基金项目: 国家科技部支撑计划(2012BAI08B05)、国际合作计划(2011DFA33130)

作者简介: 刘关玉(1987—),男,博士研究生,主要从事超快光纤激光器方面的研究。E-mail: liuguanyulh@163.com

导师简介: 张志刚(1955—),男,博士,教授,主要从事超快光学方面的研究。

E-mail: zhgzhang@pku.edu.cn(通信联系人)

和吸收体^[2-4]和非线性偏振旋转^[5-14]。非线性环路反射镜构成的8字型锁模光纤激光器锁模启动困难,常需要外部推动,而非保偏光纤对环境依赖性强;可饱和吸收体中的半导体寿命短,容易损坏;非线性偏振旋转利用三阶非线性Kerr效应的非线性偏振旋转锁模,可以提供稳定可靠的锁模启动机制,响应时间可达飞秒量级,平均功率高,并且可利用几乎所有的脉冲形成机制来获得高(低)重复频率、皮秒(飞秒)脉冲序列。若超短脉冲光纤激光器利用非线性偏振旋转机制进行锁模,则必须使用非保偏光纤,非保偏光纤决定了这种激光器必然对环境敏感。屈光矫治术即镭射视力矫正手术(LASIK)及其他角膜手术对用于眼科激光器的脉冲质量和脉冲稳定性要求比较高,因此对激光器的锁模稳定性的要求也很高。

本文搭建了基于反射式相移偏置的非线性放大环形镜全保偏锁模系统;振荡器在抽运光功率为49 mW条件下稳定输出功率为0.68 mW、重复频率为20.3 MHz的脉冲序列;通过两级单模光纤可将输出功率预放大至158 mW,再经主功率放大将输出功率放大至2.8 W;经压缩后输出功率为2.4 W,脉冲宽度为142 fs。激光器系统输出单脉冲能量为100 nJ,脉冲宽度为 10^{-10} s量级,能够满足LASIK眼角膜手术的应用。

2 实验原理与结构

2.1 非线性光纤环路反射镜锁模原理

非线性光纤环路反射镜基于Sagnac干涉原理,示意图如图1所示。入射光(E_1)进入光纤后被分为两束传播方向相反的光(E_3 和 E_4),两束光通过环内相同长度的光纤,在耦合器输出端发生干涉,因为光的分束强度不可能完全相同,所以在输出端有一定强度的光(E_{2o})输出。在输出端口的入射光强(E_2)为0的情况下,将总输出光强度与输入光强度之比定义为环形镜的反射率,反射率可以表示为^[7]

$$R = 2\eta(1 - \eta)\{1 + \cos[(1 - 2\eta)\Psi]\}, \quad (1)$$

式中 η 为耦合器两端的分束比, Ψ 为两束光在光纤中传输时获得的相移。由于引入放大器,双向传输的光场的相移量 $(1 - \eta)\Psi$ 和 $\eta\Psi$ 成为变量,相位差由 $\Delta\Psi = (1 - \eta)\Psi_2 - \eta\Psi_1$ (Ψ_1 、 Ψ_2 表示放大后双向传输光场产生的相移)给出。因此非线性放大环路反射镜的反射率可表示为

$$R = 1 - \frac{|E_{2o}|^2}{|E_1|^2} = 2\eta(1 - \eta)[1 + \cos(\Delta\Psi)]. \quad (2)$$

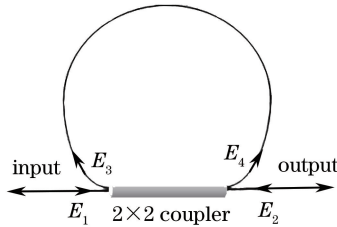


图1 非线性光纤环路反射镜原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of nonlinear fiber loop mirror

对不同分光比 η 下的反射率 R 进行数值模拟,结果如图2所示。非线性放大环路反射镜的锁模机制是将环路反射镜作为可饱和吸收体,因此需要考虑所搭建的激光器结构中环形镜的反射率,振荡器结构示意图如图3所示。由于光脉冲的中心部分和前后沿因强度不同,非线性效应引起的相移量不同,因此环形镜的反射率也不同。由图2(a)可以看出,振荡器光纤环内未引入相移时,分光比越接近50:50,则反射率的调制深度越大,因此采用45:55的分光比。光强越强,引入的相移越大,反射率越低,不利于脉冲在腔内的振荡和锁模的形成。振荡器光纤环内引入 $\pi/2$ 的相移后,不同分光比 η 下的反射率如图2(b)所示,相移量为0时,随着光强的增加,相移量增加,反射率随之增加。脉冲在通过环形镜时,因为脉冲中部光强比前后沿光强强,所以引入的相移量大,反射率也更大,更容易在腔内振荡,实现可饱和吸收的作用。

2.2 激光器系统搭建

激光器系统结构示意图如图4所示,振荡器采用放大的非线性环形镜,在环内加入 $\pi/2$ 的相移器,线性部分采用带宽为2.0 nm、中心波长为1030 nm的带通滤波器和光纤耦合输出镜(反射率为90%,透射率为10%)。耦合器的另一端为激光器的第二输出端口,整个振荡器系统采用全保偏光纤,整个激光器系统构成

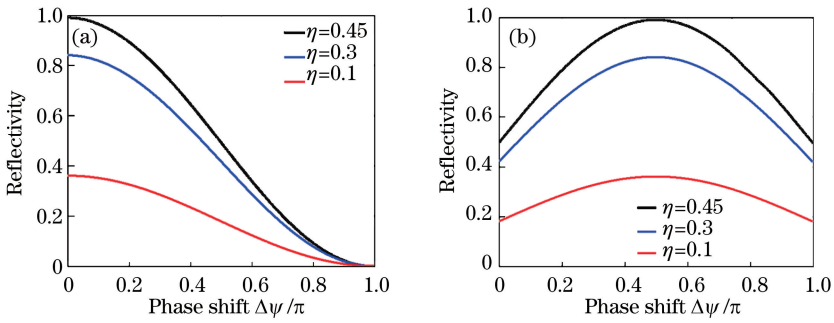


图 2 不同分光比下环形镜反射率与相移量的关系。(a)振荡器光纤环内未引入相移;(b)振荡器光纤环内引入相移

Fig. 2 Relationship between circular mirror reflectivity and amount of phase shift under different splitting ratios.

(a) Without introducing phase shift in oscillator optical fiber ring; (b) introducing phase shift in oscillator optical fiber ring

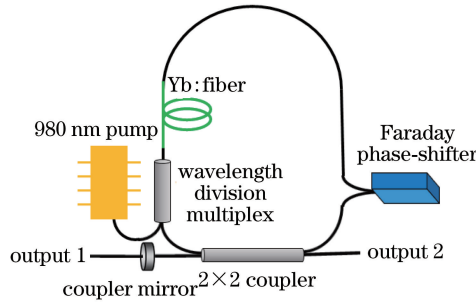


图 3 振荡器结构示意图

Fig. 3 Schematic of oscillator structure

全正色散锁模光纤激光器。激光器输出脉冲的重复频率为 20.3 MHz,平均功率为 0.68 mW。振荡器的输出功率较低,因此首先采用两级放大器预放大种子源功率,两级放大器都采用长度为 25 cm 的单模掺镱光纤(Yb1200-4/125,Nlight);然后采用主功率放大器和透射式光栅(LSFSG-1000, Lightsymth)对脉冲进行压缩补偿二阶色散,以获得百飞秒级脉冲输出。主功率放大器采用长度为 1.5 m、包层直径和纤芯直径分别为 20 μm 和 130 μm 的双包层掺镱增益光纤(Yb1200-20/125,Liekki)。抽运源采用多模抽运,最大功率为 9 W。

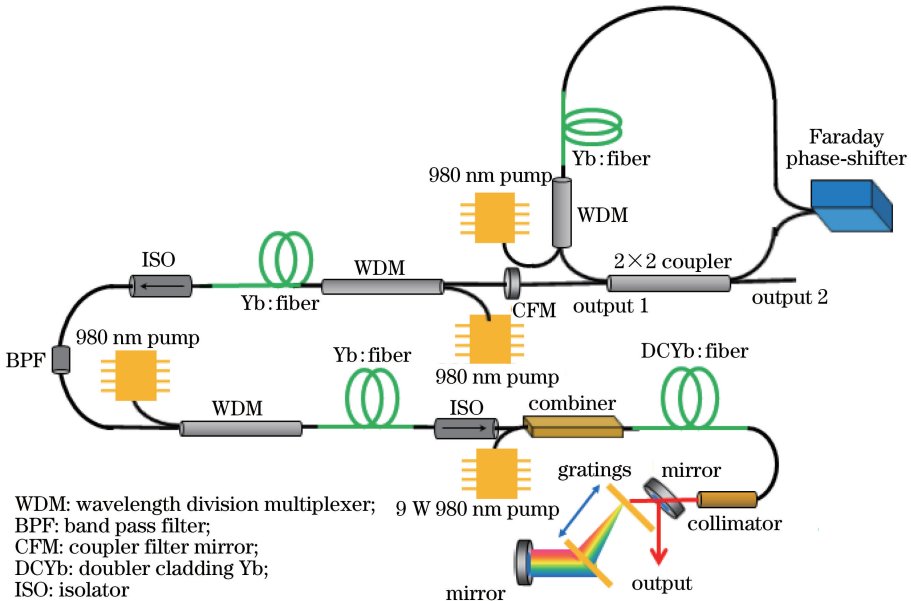


图 4 激光器系统结构图

Fig. 4 Structural schematic of laser system

3 实验结果与分析

振荡器在抽运功率为 235 mW 时实现锁模,但此时锁模状态为多脉冲状态,需不断降低抽运功率,当抽运功率降至 49 mW 时可实现单脉冲锁模,此时输出功率为 0.68 mW,重复频率为 20.3 MHz,输出光谱如图 5 中黑色曲线所示。耦合输出镜输出光谱中部出现凹陷,这是由于该振荡器是全正色散锁模机制,振荡器直线部分是带宽为 2.0 nm 的带通滤波器。一级单模放大器的抽运功率为 230 mW,输出功率为 21 mW,输出光谱如图 5 中蓝色曲线所示,自相位调制光谱出现明显的展宽;当二级单模放大器的抽运功率为 500 mW 时,输出功率为 158 mW。经双包层掺镱增益光纤的放大,当抽运功率为 8 W 时输出功率为 2.8 W,光谱得到明显展宽,光谱宽度为 9.0 nm,输出光谱如图 6 所示。对脉冲压缩后输出功率为 2.4 W,假定输出脉冲为高斯形状,脉冲宽度为 142 fs,强度自相关曲线如图 7 所示,可以看出脉冲压缩后仍具有高阶色散。

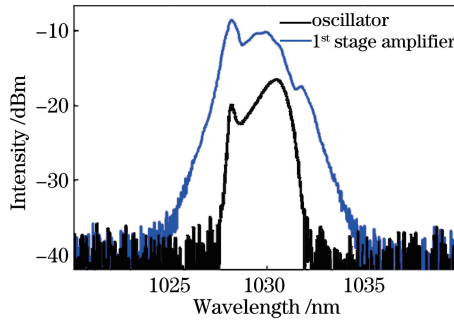


图 5 不同抽运功率下振荡器与一级放大器的输出光谱

Fig. 5 Output spectra of oscillator and 1st stage amplifier under different pump powers

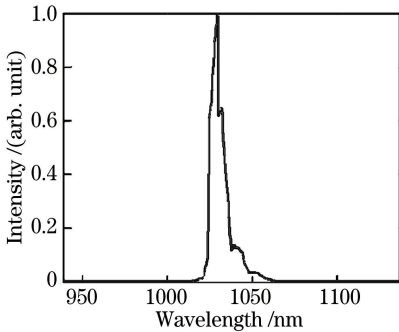


图 6 主功率放大器输出光谱

Fig. 6 Output spectrum of main power amplifier

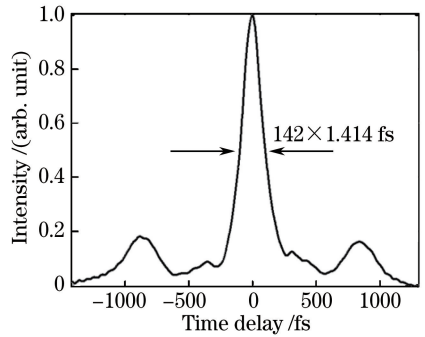


图 7 脉冲强度自相关曲线

Fig. 7 Pulse intensity autocorrelation curve

4 结 论

设计并搭建了基于反射式偏置相移的非线性放大环形镜全保偏锁模系统,实现了重复频率为 20.3 MHz 锁模脉冲序列的稳定输出;利用两级单模掺镱光纤放大、预压缩-放大、二次压缩的主功率放大结构设计,最终获得了平均功率为 2.4 W、单脉冲能量大于 100 nJ、脉冲宽度为 142 fs 的锁模脉冲激光,所实现的脉冲激光满足 LASIK 等角膜手术使用要求。

参 考 文 献

- [1] Duling I N. All-fiber ring soliton laser mode locked with a nonlinear mirror[J]. Optics Letters, 1991, 16(8): 539-541.
- [2] Keller U, Miller D A B, Boyd G D, et al. Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers: an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber[J]. Optics Letters, 1992, 17(7): 505-507.
- [3] Kieu K, Wise F W. All-fiber normal-dispersion femtosecond laser[J]. Optics Express, 2008, 16(15): 11453-11458.
- [4] Zhu Pan, Sang Mei, Gao Yang, et al. Wavelength switchable passive mode-locking fiber laser based on single-wall carbon nanotube[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0202005.

- 朱攀, 桑梅, 高杨, 等. 基于单壁碳纳米管的波长可切换被动锁模光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0202005.
- [5] Li Chao, Zhao Lei, Huang Zhihua, *et al.* Simulation study on amplitude stability in nonlinear polarization rotation mode-locked fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0202007.
- 李超, 赵磊, 黄志华, 等. 非线性偏振旋转锁模光纤激光器幅值稳定性模拟研究[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0202007.
- [6] Wilken T, Hänsch T W, Holzwarth R, *et al.* Low phase noise 250 MHz repetition rate fiber fs laser for frequency comb applications[C]. Conference on Lasers & Electro-Optics, 2007: CMR3.
- [7] Morse J L, Sickler J W, Chen J, *et al.* High repetition rate, high average power, femtosecond erbium fiber ring laser [C]. Conference on Lasers & Electro-Optics, 2009: CML1.
- [8] Ma D, Cai Y, Zhou C, *et al.* 37.4 fs pulse generation in an Er: fiber laser at a 225 MHz repetition rate[J]. Optics Letters, 2010, 35(17): 2858-2860.
- [9] Doran N J, Wood D. Nonlinear-optical loop mirror[J]. Optics Letters, 1988, 13(1): 56-58.
- [10] Sell A, Krauss G, Scheu R, *et al.* 8-fs pulses from a compact Er: fiber system: quantitative modeling and experimental implementation[J]. Optics Express, 2009, 17(2): 1070-1077.
- [11] Qi H, Zhang J, Zhou G J, *et al.* 325 MHz and near transform-limited pulse output directly from an Er: fiber ring laser [J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(6): 061402.
- [12] Kim S, Kim Y, Park J, *et al.* Hybrid mode-locked Er-doped fiber femtosecond oscillator with 156 mW output power [J]. Optics Express, 2012, 20(14): 15054-15060.
- [13] Li X, Zou W W, Yang G, *et al.* Direct generation of 148 nm and 44.6 fs pulses in an Erbium-doped fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(1): 93-96.
- [14] Zhao L M, Lu C, Tam H Y, *et al.* High fundamental repetition rate fiber lasers operated in strong normal dispersion regime[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(11): 724-726.