

文章编号: 0258-7025(2006)08-1021-04

被动调 Q 锁模掺镱光纤激光器

甘 雨^{1,2}, 向望华^{1,2}, 周晓芳^{1,2}, 张贵忠^{1,2}, 张 喆^{1,2}, 王志刚^{1,2}

(天津大学¹精密仪器与光电子工程学院, ²教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)

摘要 报道了基于偏振旋转技术等快可饱和吸收体的被动调 Q 锁模光纤激光器, 采用 976 nm 半导体激光器作为抽运源, 高掺杂浓度的 Yb³⁺ 光纤作为增益介质构成环形腔, 通过调节抽运光功率和偏振控制器的角度得到了调 Q, 调 Q 锁模与锁模三种稳定的输出脉冲。获得的锁模脉冲中心波长为 1.05 μm, 重复频率为 20 MHz, 脉冲光谱宽度为 13.8 nm, 抽运功率为 270 mW 时, 锁模平均输出功率为 15.82 mW; 调 Q 频率为 17.54 kHz, 调 Q 脉冲宽度为 8 μs, 光谱宽度为 4.7 nm; 调 Q 锁模中调 Q 重复频率为 300 kHz。

关键词 激光器; 调 Q; 锁模; 偏振旋转; Yb³⁺ 光纤激光器

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Passive Q-Switching and Modelocking Yb³⁺-Doped Fiber Laser

GAN Yu^{1,2}, XIANG Wang-hua^{1,2}, ZHOU Xiao-fang^{1,2},
ZHANG Gui-zhong^{1,2}, ZHANG Zhe^{1,2}, WANG Zhi-gang^{1,2}

(¹College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, ²Key Laboratory of Optoelectronics Information and Technical Science (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract An all fiber laser based upon nonlinear polarization rotation as an effective fast saturable absorber for mode-locking is reported. The absorber can act as passive Q-switching and modelocking. The ring laser with a highly Yb³⁺-doped fiber as the gain medium, pumped by a semiconductor laser of 976 nm wavelength, can operate in three different stable regimes by proper adjustments of pump power and polarizer orientations: Q-switched, Q-switched mode-locked and continuous wave (CW) mode-locked. The center wavelength of the CW mode-locked pulse is 1.05 μm with a full width at half maximum (FWHM) spectrum of 13.8 nm, the pulse repetition rate is 20 MHz, and an average output power is 15.82 mW with 270 mW pump power. In Q-switched regime, the laser generates 8 μs duration pulses of 4.7 nm FWHM spectrum at a repetition rate of 17.54 kHz. The Q-switched repetition rate is 300 kHz in Q-switched mode-locked regime.

Key words lasers; Q-switched; mode-locked; polarization rotation; Yb³⁺ fiber laser

1 引 言

稳定、低噪声的超短脉冲光源在超快光谱学、多光子显微学、超快生物学和光通信等领域具有很重要的应用价值。锁模光纤激光器以其结构紧凑、小型化、成本低、易于实现全固化等优良的性能有望在许多应用中替代传统的固体锁模激光器。基于以上的特点, 在过去的 10 年中, 锁模光纤激光器得到了

极大的发展, 大量的研究工作主要围绕掺铒光纤和掺镱光纤进行^[1~3]。近年来, 同其他掺杂粒子相比, 以镱元素作为增益粒子的掺镱光纤具有高的量子效率, 没有基态和激发态吸收, 长的上能级寿命, 宽的吸收谱, 在 915 nm 和 976 nm 处具有吸收峰, 高掺杂时无浓度淬灭, 便于半导体激光器抽运等优点, 将取代掺铒光纤, 成为 1 μm 波段的主要工作物质。在超

收稿日期: 2005-12-01; 收到修改稿日期: 2006-02-27

基金项目: 天津市科委基金(043601011)和高等学校博士学科点专项科研基金(20050056004)项目资助。

作者简介: 甘 雨(1978—), 男, 黑龙江牡丹江人, 天津大学精密仪器与光电子工程学院博士研究生, 主要从事超短脉冲激光器和超高速光通信的研究。E-mail: rainmangy@yahoo.com.cn

导师简介: 向望华(1947—), 男, 湖南溆浦人, 天津大学精密仪器与光电子工程学院教授, 博士生导师, 目前研究方向为光电子技术、超快激光与光通信技术方面的研究。E-mail: wanghuaxiang@tju.edu.cn

短脉冲方面,其增益带宽可支持小于30 fs的变换极限脉冲, H. Lim 等利用掺 Yb³⁺ 光纤环形腔激光器产生了52 fs,46 MHz的锁模脉冲输出^[4],为目前所报道的掺 Yb³⁺ 光纤环形腔激光器的最短脉冲输出。采用 Yb³⁺ 光纤可产生高功率的超短光脉冲,2001年 D. Nickel 等采用包层抽运技术获得了平均输出功率20 W,单脉冲能量100 μJ量级的超短光脉冲^[5]。中国科学院西安光学精密机械研究所获得了重复频率为15.4 kHz,光谱宽度为10 nm,稳定的锁模脉冲输出^[6]。

本文报道了一个掺 Yb³⁺ 光纤激光器利用偏振旋转技术和增益光纤的未饱和吸收作用,在同一个环行光纤激光器装置中分别获得调 Q,调 Q 锁模和锁模三种光脉冲形式,且在一定条件下均有非常稳定的输出。作为种子光源,提供了良好的稳定性与可选性,在此基础上可进一步对三种脉冲形式进行分别放大或腔外压缩,以达到不同应用的目的。

2 实验装置及原理

实验装置如图1所示,光纤激光器所用抽运源为 JDSU 976 nm 半导体激光器,最大尾纤输出光功率为290 mW。智能温度功率控制电路,可保证实验的稳定性和低噪声。所用增益光纤为加拿大 INO 公司的高掺杂浓度镱光纤,在吸收峰值波长976 nm 处的吸收系数为196 dB/m,足够高的掺杂浓度为高增益,缩短脉冲光纤激光器的腔长从而获得较高的重复频率提供了可能。抽运耦合装置采用熔融拉锥的980/1060 nm 波分复用器(WDM),带宽为±15 nm。

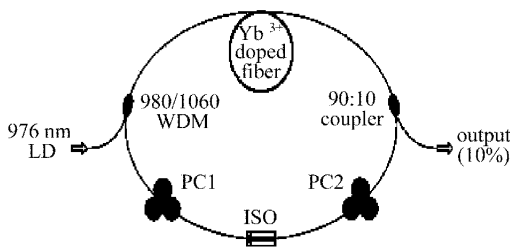


图1 锁模调 Q 光纤激光器实验原理图

Fig. 1 Experimental setup of Q-switching and mode-locking fiber laser

实验中所用隔离器(ISO)为偏振相关隔离器,可保证腔内运转光单方向运转。同时由于消除了腔内运转光的反方向传输,抑制了由于腔内光功率较高而引起的光纤中背向布里渊散射等非线性效应对

实验的影响。其与光纤偏振控制器一起,作为产生超短脉冲的重要器件之一。PC1,PC2 为光纤偏振控制器,它是利用光纤的弹光效应改变光纤中的双折射,从而控制光纤中光波的偏振态。其作用可以等效为1/4波片+1/2波片+1/4波片的组合,1/4波片用来控制椭圆度,1/2波片用来控制方位角。

被动锁模光纤激光器的工作原理主要是利用光纤内的一些非线性效应(自相位调制(SPM),交叉相位调制(XPM)、群速度色散(GVD)),由偏振相关隔离器和两个光纤偏振控制器构成的等效快可饱和吸收体对腔内的初始光脉冲进行周期性的调制稳态输出。经过偏振相关隔离器的线偏振光被偏振控制器 PC1 将其偏振态改变为椭圆偏振,此椭圆偏振光(振幅为 A)可以被分解为两个沿坐标轴(x,y轴)相互垂直的、具有不同强度的线偏振光,它们具有相同的相位,其振幅分别为 $A_x = A \cos \alpha$, $A_y = A \sin \alpha$ 。两线偏振光进入 Yb³⁺ 增益光纤后,由于光纤中的自相位调制和交叉相位调制的非线性作用而产生相移。其中自相位调制和交叉相位调制对沿坐标轴(x,y轴)分解的两个方向互相垂直的线偏振光产生的相移分别为^[7]

$$\begin{aligned} \Phi_x &= \{\beta_x + Kn_2[|A_x|^2 + (2/3)|A_y|^2]\}2L, \\ \Phi_y &= \{\beta_y + Kn_2[|A_y|^2 + (2/3)|A_x|^2]\}2L, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 β_x, β_y 分别为沿 x,y 方向的传输常数,K 为自由空间传输常数, n_2 为非线性折射率,L 为光纤长度。

沿 x,y 方向分解的两振动分量产生了 $\Delta\Phi = \Phi_x - \Phi_y$ 的相位差,因而合成叠加后光的偏振态会发生变化,即经 Yb³⁺ 增益光纤后输出光的偏振态发生了变化。由(1)式可以看出,相移是强度相关的,光脉冲的中心和两翼光强不同,因而相移不同,所以经 Yb³⁺ 增益光纤后输出光脉冲的中心和两翼具有不同的偏振态。调节偏振控制器 PC2,迫使在脉冲中心部分线性偏振,使得偏振隔离器能透过脉冲中心的高强度部分而阻挡低强度的脉冲边翼,结果脉冲在腔内往返一次后得到窄化,与快饱和吸收体相类似,腔内脉冲不断受到这种周期调制,形成被动锁模短脉冲序列输出。

3 实验结果及分析

3.1 调 Q 实验

实验中,首先将抽运光设定在较低的功率状态下(但超过光纤激光器的阈值抽运功率),仔细调节

光纤偏振控制器的角度,同时尽量降低和减少腔内的各种损耗(微弯损耗、焊接损耗等),在调节过程中通过示波器观察光纤激光器的输出特性。当偏振控制器在某一角度时,可以得到稳定的脉冲序列输出,它不同于文献报道的所谓自脉动行为^[8,9],一般自脉动的脉冲幅度和周期都不太均匀,而本实验中,其脉冲周期和幅度都十分均匀,而且极其稳定,与锁模脉冲序列极为相似,但与锁模脉冲序列的周期却极不相符,所以认为所得脉冲为调Q脉冲序列。如图2所示。其重复频率为17.54 kHz,脉冲宽度为8 μs。此时光谱如图3所示,光谱宽度为4.7 nm。保持此时的偏振控制器状态,小心调节抽运光功率大小,发现抽运光功率在20~50 mW时均可保持稳定的调Q脉冲序列。产生上述调Q脉冲可能起因于掺Yb³⁺光纤中的饱和吸收效应^[8,10~12],掺Yb³⁺光纤具有典型的二能级结构,由于斯塔克效应,其吸收谱和发射谱具有很大的重叠区域,在抽运功率比较小的情况下,远离抽运端的一段掺Yb³⁺光纤因抽运功率不足未能实现粒子数反转,因而对腔内的运转光产生可饱和吸收,从而导致激光器出现调Q脉冲输出。当提高抽运光功率后,此时由于远离抽运端起饱和吸收作用的那段掺Yb³⁺光纤被“漂白”,调Q脉冲消失,这与我们的实验现象相符。又PC1,PC2

和偏振隔离器的组合导致腔内运转光的损耗发生变化,调节Q值的大小,同时对光脉冲起到稳定和窄化的作用。

3.2 调Q锁模

当继续增大抽运光的功率,此时调Q状态随之消失,激光器工作在稳定的连续输出状态。当偏振控制器到某一角度时,产生稳定的调Q锁模脉冲序列,如图4所示。其中调Q包络重复频率为300 kHz;锁模脉冲重复频率为20 MHz。此时光谱如图5所示,其光谱宽度为11.5 nm。根据锁模原理中腔长L与频率f的关系 $f = c/nL$,其中c表示真空中的光速,n表示传输介质的折射率,可以得到,在光纤长为10.4 m时,对应的锁模重复频率为20 MHz,也就是说锁模脉冲间隔为50 ns。由图4看到,锁模脉冲完全符合腔长与频率的关系,即可以判断所观察到的现象就是调Q锁模。这时的抽运光功率在130~160 mW且均可保持稳定的调Q锁模脉冲序列。

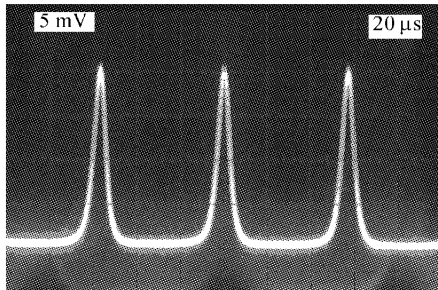


图2 调Q脉冲序列
Fig. 2 Q-switching pulse train

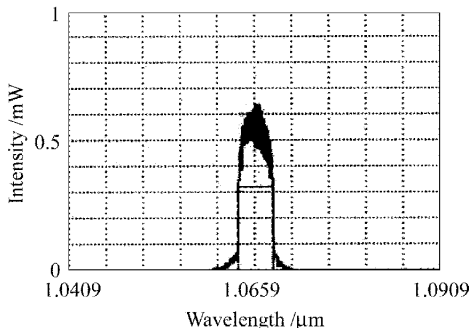


图3 调Q光谱图
Fig. 3 Q-switching spectrum

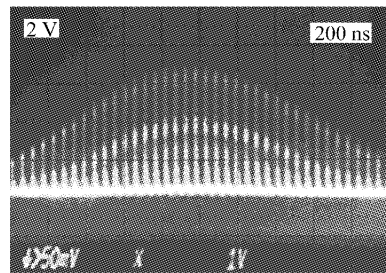


图4 调Q锁模脉冲序列

Fig. 4 Q-switched mode-locked pulse train

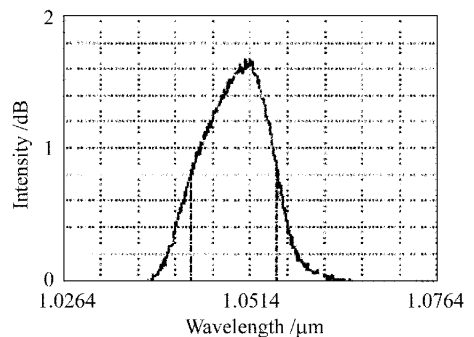


图5 调Q锁模光谱图

Fig. 5 Q-switched mode-locked spectrum

3.3 锁模运转

进一步增大抽运光功率,同时略微调整偏振控制器的角度,此时得到稳定的锁模脉冲序列输出,如图6所示;锁模脉冲重复频率为20 MHz。此时光谱图如图7所示,其光谱宽度为13.8 nm。保持此时的偏振控制器状态,测定了锁模状态下光纤激光器的

输出功率随抽运光功率变化的曲线,如图8所示,抽运光功率在160~270 mW时均可保持稳定的锁模脉冲序列。假设脉冲为双曲正割型,依据 $\Delta\nu\Delta\tau = 0.315$,其中 $\Delta\nu$ 表示脉冲的频谱宽度, $\Delta\tau$ 表示脉冲的时间宽度,则变换极限脉冲宽度可达百飞秒左右。但由于 Yb^{3+} 光纤的正色散会导致脉冲的展宽,故实际脉冲的宽度可能为皮秒量级,正在设法测量其真实的脉冲宽度。

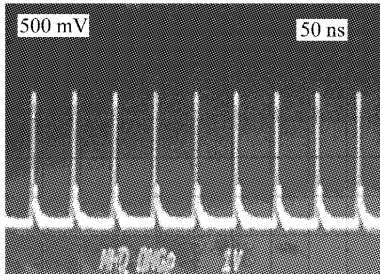


图6 锁模脉冲序列

Fig. 6 CW mode-locking pulse train

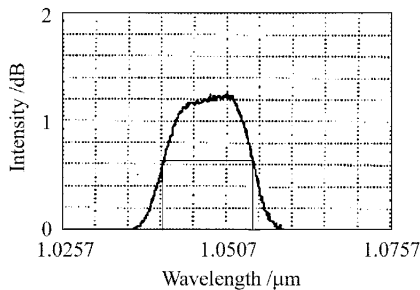


图7 锁模光谱图

Fig. 7 CW mode-locking spectrum

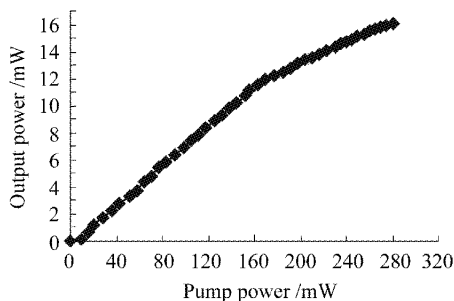


图8 光纤激光器的输出功率随抽运光功率的变化曲线

Fig. 8 Output power versus pump power of fiber laser

4 结 论

利用偏振控制器和偏振敏感型隔离器形成的非线性旋转作为等效快可饱和吸收体,在掺镱环形光纤激光器内获得了中心波长为1.05 μm ,重复频率为20 MHz,脉冲光谱宽度为13.8 nm的稳定的连续

锁模脉冲输出,抽运功率为270 mW时,连续锁模平均输出功率为15.82 mW;通过改变偏振控制器的角度与抽运功率的大小同时实现了稳定的调Q锁模脉冲输出,其中调Q锁模中调Q包络的重复频率为300 kHz;利用未完全抽运掺镱光纤的可饱和吸收作用,在较低抽运功率下又获得了稳定的调Q脉冲输出,Q转换频率为17.54 kHz,脉冲宽度为8 μs ,光谱宽度为4.7 nm。

参 考 文 献

- 1 H. A. Haus, E. P. Ippen, K. Tamura. Additive-pulse mode locking in fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(1):200~208
- 2 L. E. Nelson, D. J. Jones, K. Tamura *et al.*. Ultrashort-pulse fiber ring lasers [J]. *Appl. Phys. B*, 1997, **65**(2):277~294
- 3 M. Leitner, P. Glas, T. Sandrock *et al.*. Self-starting mode locking of a Nd:glass fiber laser by use of the third-order nonlinearity of low-temperature-grown GaAs [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(22):1567~1569
- 4 H. Lim, F. Ö. Ilday, F. W. Wise. Generation of 2-nJ pulses from a femtosecond ytterbium fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(8):660~662
- 5 D. Nickel, A. Liem, J. Limpert *et al.*. Fiber based high repetition rate, high energy laser source applying chirped pulse amplification [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **190**(1-6):309~315
- 6 Yang Lingzhen, Chen Guofu, Wang Yishan *et al.*. Experimental study of ultrashort pulse Yb^{3+} -doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):153~155
杨玲珍,陈国夫,王屹山等.超短脉冲掺 Yb^{3+} 光纤激光器实验研究[J].中国激光,2005, **32**(2):153~155
- 7 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics and Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. third edition. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin translated. Beijing: Electronics Industry Press, 2002. 130~135
G. P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M].贾东方,余震虹,谈斌译.北京:电子工业出版社,2002. 130~135
- 8 Su Hongxin, Lü Kecheng, Yan Peiguang *et al.*. Experimental study on the self-pulsation behavior of LD end-pumped Yb^{3+} -doped double clad fiber laser [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2003, **20**(4):422~425
苏红新,吕可诚,闫培光等.LD端面抽运掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器自脉动行为的实验研究[J].量子电子学报,2003, **20**(4):422~425
- 9 Ammar Hideur, Thierry Chartier, Cafer Ozkul *et al.*. Dynamics and stabilization of a high power side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **186**(4-6):311~317
- 10 Ammar Hideur, Thierry Chartier, Marc Brunel *et al.*. Mode-lock, Q-switch and CW operation of an Yb-doped double-clad fiber ring laser [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **198**(1-3):141~146
- 11 Shumin Zhang, Fuyun Lu, Chunxia Xie *et al.*. Temporal characteristics of a high-energy Er/Yb-codoped fibre ring laser [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2005, **7**(4):175~178
- 12 M. Nakazawa, K. Suzuki, H. Kubota *et al.*. Self-Q-switching and mode locking in a 1.53 μm fiber ring laser with saturable absorption in erbium-doped fiber at 4.2 K [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(8):613~615