

基于铥钬共掺光纤的掺铒光纤激光器调 Q 与锁模

陶蒙蒙 叶锡生 王 平 王振宝 杨鹏翎 冯国斌

(西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘要 利用铥钬共掺光纤作为可饱和吸收体, 实现了对环形腔掺铒光纤激光器的调 Q 和锁模。调 Q 实验中, 在 1567.8 nm 处, 随着抽运功率的增加, 获得了从千赫兹到几十千赫兹的重复频率可调谐调 Q 输出, 脉冲宽度在数微秒量级。锁模实验中, 在 1535.2 nm 处, 通过调节偏振控制器, 获得了调 Q 锁模输出; 进一步提高抽运功率, 并调节偏振控制器, 获得了腔基频锁模输出和二阶有理数谐波锁模输出, 重复频率在几十兆赫兹量级, 脉冲宽度减小到几十纳秒量级。实验证明了铥钬共掺光纤优异的可饱和吸收特性, 及其在掺铒光纤激光器全光纤被动调 Q 和锁模中的应用潜力。

关键词 激光器; 被动调 Q; 锁模; 可饱和吸收光纤

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s102003

Q-Switching and Mode-Locking of Er-Doped Fiber Lasers Based on Tm-Ho Codoped Fiber

Tao Mengmeng Yi Xisheng Wang Ping Wang Zhenbao
Yang Pengling Feng Guobin

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

Abstract Exploiting Tm-Ho codoped fiber as the saturable absorber, stable passive Q-switching and mode-locking of an Er-doped fiber ring laser is achieved. In the Q-switching operation mode, the repetition rate is tunable with pump power from several kHz to tens of kHz at 1567.8 nm, and the pulse duration is at the μs level. With polarization control, Q-switched mode-locking operation is observed at 1535.2 nm. Further increasing the pump power and tuning the polarization controller, mode-locking is achieved with repetition rate of tens of MHz and pulse duration of tens of ns. With even higher pump power, 2nd order rational harmonic mode locking is obtained. The experiments demonstrate that Tm-Ho codoped fiber is an excellent saturable absorber for all fiber passive Q-switching and mode-locking of Er-doped fiber lasers.

Key words lasers; passive Q-switching; mode-locking; fiber saturable absorber

OCIS codes 140.3500; 140.3540; 140.4050; 140.3538

1 引 言

光纤激光器获得脉冲输出的主要方法有增益开关^[1]、调 Q^[2]和锁模^[3]。增益开关方法使用脉冲抽运源对增益光纤进行抽运, 从而获得脉冲信号输出。该方法要求增益介质的抽运吸收能级与激光上能级

重合(同带抽运)或两者之间有着很高的跃迁速率, 因此其应用受到很大的局限^[4]。调 Q 和锁模是获得脉冲输出的最常用方法。与传统的声光/电光晶体^[5]相比, 各种可饱和吸收体的使用, 如半导体可饱和吸收镜^[6]、石墨烯^[7]、碳纳米管^[8]等, 使得调 Q 和

收稿日期: 2013-09-30; 收到修改稿日期: 2013-11-02

作者简介: 陶蒙蒙(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器技术及应用等方面的研究。

E-mail: tonylemon@hotmail.com

导师简介: 叶锡生(1967—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光技术及应用等方面的研究。

E-mail: yxschx@yeah.net(通信联系人)

锁模光纤激光器的结构更加简单。近年来,可饱和和吸收光纤逐渐受到人们的重视^[9]。与半导体可饱和和吸收镜等可饱和吸收元件相比,可饱和光纤的使用可以使光纤激光器实现更加严格意义上的全光纤结构;而且,可饱和吸收光纤可直接用于高能量脉冲的产生^[10],这对新型光纤激光的高平均功率输出和应用具有重要价值。

在可饱和吸收光纤调 Q 和锁模中,一般都需要使用两段光纤:一段是增益光纤,用于产生激光信号;另一段是可饱和吸收光纤,用于对激光信号进行脉冲调制。可饱和吸收光纤中的基态掺杂离子吸收增益光纤产生的激光信号,使谐振腔处于低 Q 值状态。随着对信号光的不断吸收,可饱和吸收光纤逐渐达到饱和,对信号光的吸收能力也就下降,使谐振腔处于高 Q 值状态,于是产生一个激光脉冲输出。与此同时,可饱和吸收光纤中激发态的掺杂离子通过无辐射跃迁等过程衰减到基态,然后重新开始对信号光的吸收过程。这样,就实现了对信号光的脉冲调制。到目前为止,利用掺杂 Cr、Sm、Tm、Ho 以及 Bi 等离子体的光纤作为可饱和吸收光纤,已经实现了对掺 Nd、Yb、Er 以及 Tm 等增益光纤的被动调 Q^[11-17]。

2010 年, T Tsai 等^[18]首次提出并验证了利用掺铥光纤作为可饱和吸收光纤,实现掺铥光纤激光器被动调 Q 的可行性。利用一个线型腔结构,他们获得了 420 ns 的稳定调 Q 脉冲输出。受限于铥离子激光上能级寿命(约 500 μ s),在稳定输出下获得的最高重复频率仅为 2 kHz。继续提高抽运功率,激光器重复频率可提升至 6 kHz,但是激光脉冲能量开始下降。

本文报道了利用铥钬共掺光纤实现对掺铥光纤激光器的调 Q 和锁模。在调 Q 实验中,在 1567.8 nm 处获得了 3~48.7 kHz 的重复频率可调谐调 Q 输出,脉冲宽度在 7~10 μ s;在锁模实验中,通过偏振控制,获得了调 Q 锁模输出;提高抽运功率,相继获得了腔基频锁模输出(10.1 MHz)和二阶有理数谐波锁模输出(20.2 MHz),脉冲宽度分别为 47.2 ns 和 25.7 ns。通过调节法布里-珀罗(FP)滤波器,在较宽的光谱范围内都可以获得稳定的调 Q 和锁模输出。

2 实验装置

搭建如图 1 所示的环形腔掺铥光纤激光器。抽运源为 980 nm 的单模半导体激光器,最高输出功率为 400 mW。环形腔中掺铥光纤为增益光纤,用于产生 1550 nm 附近的激光,长度为 9 m。该光纤

在 980 nm 处吸收系数约为 4.6 dB/m。隔离器的使用使得环形腔形成一个行波腔,保证了信号光在腔内的单向传输。

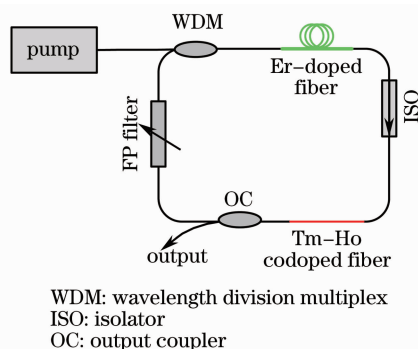


图 1 利用铥钬共掺光纤对掺铥光纤激光器调 Q 实验光路图

Fig. 1 Experimental setup for the passive Q-switching of Er-doped fiber ring laser with Tm-Ho codoped fiber as the saturable absorber

谐振腔中,铥钬共掺光纤作为可饱和光纤使用,长度为 20 cm,其在 1550 nm 处的吸收系数约为 13.3 dB/m。可调谐 FP 腔滤波器自由光谱范围为 104 nm,精细度为 560,用于选择腔内的谐振波长。腔内 30% 的信号光通过输出耦合器输出。环形腔腔长约为 20 m。

3 实验研究与分析

3.1 调 Q 运转

利用法珀腔将激光器谐振波长调整到 1567.8 nm 处。1567.8 nm 处激光器稳定调 Q 状态下重复频率与平均输出功率特性见图 2。由图 2 可见,稳定调 Q 下,激光器的重复频率随着抽运功率的增加而单调递增。线性拟合结果显示,重复频率增加速率约为 300 Hz/mW。FP 腔滤波器的使用在

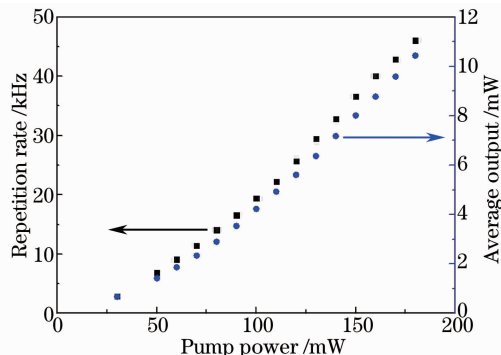
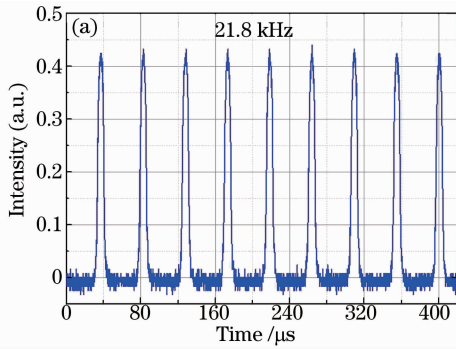


图 2 1567.8 nm 处调 Q 重复频率与输出功率实验结果
Fig. 2 Repetition rate and average output of stable passive Q-switching at 1567.8 nm

谐振腔内引入了较大的损耗,激光器光光转换效率较低。典型的调Q输出波形见图3,由图3可以看



出,稳定调Q状态下,激光脉冲宽度在数微秒量级,单脉冲能量约为0.2 μJ。

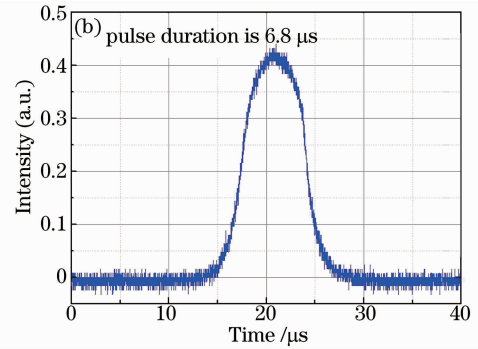


图3 1567.8 nm处典型调Q输出波形。(a) 脉冲串;(b) 单个脉冲

Fig. 3 Typical passive Q-switching waveform at 1567.8 nm. (a) Stable pulse train; (b) single pulse

该激光器系统的最高重复频率为48.7 kHz,与掺铥光纤可饱和吸收体相比,重复频率有较大提高。最高重复频率处的调Q输出波形见图4。从图4可以看出,与图3相比,在该重复频率下激光器输出含有连续波分量。继续提高抽运功率,激光器进入连续波运行状态。

铥钕共掺光纤的长度增加至60 cm,同时在腔内加入偏振控制器,调整FP腔滤波器到1535.2 nm。

在45 mW抽运下,通过调节偏振控制器即可获得调Q锁模输出。典型调Q锁模输出波形见图5所示。

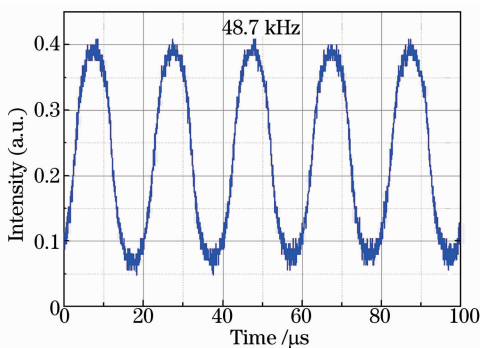


图4 最高重复频率稳定调Q输出波形

Fig. 4 Stable passive Q-switching waveform at the highest repetition rate

3.2 锁模运转

在获得稳定调Q脉冲输出的基础上,将图2中的

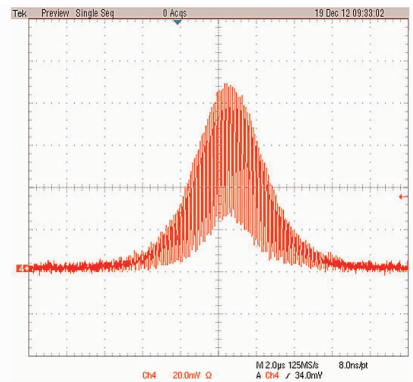


图5 1535.2 nm处典型调Q锁模输出波形

Fig. 5 Typical Q-switched mode-locking waveform at 1535.2 nm

继续提高抽运功率到80 mW,激光器出现锁模状态,输出波形见图6(a)。其锁模重复频率为10.1 MHz。由于环形腔长度约为20 m,则脉冲在

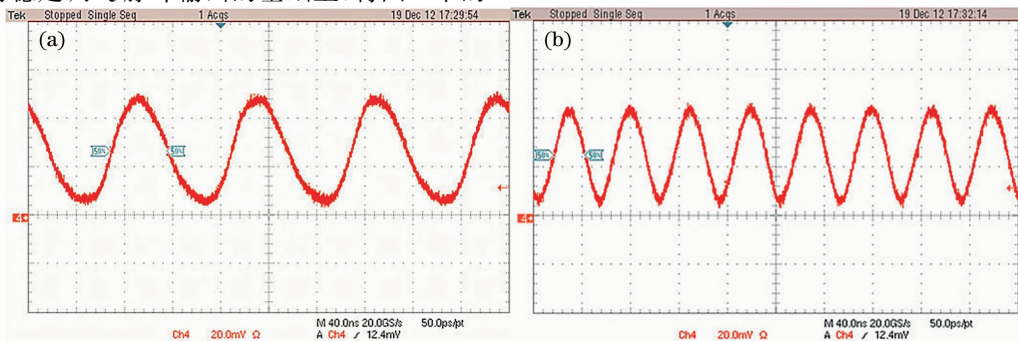


图6 1535.2 nm处典型锁模输出波形。(a) 基频锁模;(b) 二阶有理数谐波锁模

Fig. 6 Typical mode-locked waveform at 1535.2 nm. (a) Fundamental cavity frequency mode-locking; (b) 2nd order rational harmonic mode-locking

环形腔内的循环时间约为 100 ns, 对应的腔基频为 10 MHz^[19]。可见, 此时激光器处于基频锁模状态。图中可以读出基频锁模状态下激光脉冲宽度约为 47.2 ns。

继续提高抽运功率, 通过调节偏振控制器, 可观察到二阶有理数谐波锁模, 见图 6(b)。其锁模重复频率为 20.2 MHz, 对应两倍的腔基频; 脉冲宽度约为 25.7 ns。

由于铥钬共掺光纤在 1550 nm 波段有着很宽的吸收谱, 在实验中, 通过调谐 FP 腔滤波器, 该系统可以在较宽的波长范围内获得稳定的调 Q 输出和锁模输出。

4 结 论

通过在掺铒光纤激光器的环形腔内加入一段铥钬共掺光纤作为可饱和吸收体, 实现了对 1550 nm 波段激光的脉冲调制, 获得了稳定的调 Q 和锁模输出。

与掺铒可饱和吸收光纤相比, 铥钬共掺光纤可饱和吸收体能够对信号光实现更快的调制, 从而获得更高重复频率的调 Q 脉冲输出。通过引入偏振控制, 实现了掺铒光纤激光器的基频锁模输出和二阶有理数锁模输出。与调 Q 相比, 锁模输出的激光脉冲不仅在重复频率上提高了两个数量级, 而且在脉冲宽度上也获得了两个数量级的窄化。另外, 由于铥钬共掺光纤在 1550 nm 波段有着很宽的吸收谱, 因此在该波段可以实现较宽范围的调 Q 和锁模输出。

参 考 文 献

- 1 M Tao, L Zhang, Y Wu, *et al.*. Gain-switching and gain-switched mode-locking operation of a Tm/Ho co-doped fiber laser [J]. *Laser Phys*, 2013, 23(9): 095109.
- 2 C J Gaeta, M J F Digonnet, H J Shaw. Pulse characteristics of Q-switched fiber lasers[J]. *J Lightwave Technol*, 1987, 5(12): 1645-1651.
- 3 F W Wise, A Chong, W H Renninger. High-energy femtosecond

- fiber lasers based on pulse propagation at normal dispersion[J]. *Laser Photonics Rev*, 2008, 2(1-2): 58-73.
- 4 J Yang, Y Tang, J Xu. Development and applications of gain-switched fiber lasers[J]. *Photon Res*, 2013, 1(1): 52-57.
- 5 Q Huang, T Yu, Y Zheng, *et al.*. 2.4-W narrow-linewidth Q-switched Tm-doped double-clad fiber laser[J]. *IEEE Photonics J*, 2013, 5(2): 1500406.
- 6 J Long, D Shen, Y Wang, *et al.*. Stable passively Q-switched operation of Tm doped silica fiber laser by anti-resonant fabry-perot saturable absorber[J]. *Laser Phys*, 2012, 22(5): 986-990.
- 7 J Wu, M Tao, Y Wu, *et al.*. Q-switched and mode-locked erbium-doped fiber laser based on graphene saturable absorber [C]. *SPIE*, 2013, 8796: 87962C.
- 8 F Wang, Z Jiang, T Hasan, *et al.*. Double-wall carbon nanotube Q-switched and mode-locked two-micron fiber lasers[C]. *Proc. of the European Conference on Lasers and Electro-Optics San Jose, California United States (Optical Society of America, 2012)*, 2012, CF1N.4.
- 9 A S Kurkov. Q-switched all-fiber lasers with saturable absorbers [J]. *Laser Phys Lett*, 2011, 8(5): 335-342.
- 10 A Fotiadi, I Razdobreev, B Segard, *et al.*. Stable self-pulse behaviour of two-core Yb/Sm fiber laser[C]. *Proc. the European Conference on Lasers and Electro-Optics (IEEE, 2009)*, Munich Germany. 2009, CJ3.
- 11 A S Kurkov, Y E Sadovnikova, A V Marakulin, *et al.*. All fiber Er-Tm Q-switched laser[J]. *Laser Phys Lett*, 2010, 7(11): 795-797.
- 12 A S Kurkov, E M Scholokhov, O I Medvedkov. All fiber Yb-Ho pulsed laser[J]. *Laser Phys Lett*, 2009, 6(2): 135-138.
- 13 V V Dvoyrin, V M Mashinsky, E M Dianov. Yb-Bi pulsed fiber lasers[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(5): 451-453.
- 14 L Tordella, H DeJellout, B Dussardier, *et al.*. High repetition rate passively Q-switched Nd:Cr all fiber laser[J]. *Electron Lett*, 2003, 39(18): 1307-1308.
- 15 P Adel, M Auerbach, C Fallnich. Passive Q-switching by Tm co-doping of a Yb-fiber laser[J]. *Opt Express*, 2003, 11(21): 2730-2735.
- 16 C E Preda, G Ravet, P Megret. Experimental demonstration of a passive all-fiber Q-switched erbium- and samarium-doped laser [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(4): 629-631.
- 17 S D Jackson. Passively Q-switched Tm-doped silica fiber lasers [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(16): 3311-3317.
- 18 T Tsai, Y Fang, S Huang. Passively Q-switched erbium all-fiber lasers by use of thulium-doped saturable-absorber fibers[J]. *Opt Express*, 2010, 18(10): 10049-10054.
- 19 M Tao, J Zhao, Y Yan, *et al.*. Experimental investigation of gain-switched Tm-Ho co-doped single clad fiber lasers[J]. *Laser Phys*, 2013, 23(10): 105101.

栏目编辑:殷建芳