

doi:10.3788/gzxb20184709.0914001

# 基于 $\text{MoO}_3$ 可饱和吸收体的掺镱被动锁模 光纤激光器

江俊林<sup>1</sup>, 乐文杰<sup>1</sup>, 王玮琦<sup>2</sup>, 丁翌辰<sup>1</sup>, 吴波<sup>1</sup>, 沈永行<sup>1</sup>

(1 浙江大学 光电科学与工程学院 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2 浙江大学 材料科学与工程学院, 杭州 310027)

**摘 要:**报道了一种基于  $\text{MoO}_3$  可饱和吸收体的连续锁模、调 Q 锁模掺镱光纤激光器.采用环形腔结构,在泵浦功率为 95 mW 时,获得了稳定的重复频率为 17 MHz 的连续锁模脉冲输出,单脉冲宽度为 130 ps,光谱中心波长为 1 067.06 nm,谱线 3 dB 带宽为 0.27 nm.在泵浦功率为 280 mW 时,产生稳定的调 Q 锁模脉冲输出.当泵浦功率从 280 mW 变化到 400 mW 的过程中,调 Q 锁模包络重复频率从 26.51 kHz 变化到 48.7 kHz,包络半高宽度从 14.6  $\mu\text{s}$  变化到 4.1  $\mu\text{s}$ ,子脉冲的宽度和光谱中心波长基本保持不变,谱线 3 dB 带宽变为 0.62 nm.

**关键词:**激光器;被动锁模光纤激光器;三氧化钼;掺镱锁模光纤激光器;锁模

中图分类号:TN248.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)09-0914001-6

## Passively Mode-locked Ytterbium-doped Fiber Laser Based on $\text{MoO}_3$ as Saturable Absorber

JIANG Jun-lin<sup>1</sup>, YUE Wen-jie<sup>1</sup>, WANG Wei-qi<sup>2</sup>, DING Yi-chen<sup>1</sup>, WU Bo<sup>1</sup>, SHEN Yong-hang<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2 School of Materials Science & Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** A  $\text{MoO}_3$  saturable absorber based on Yb-doped mode-locked fiber laser which can operate in both continuous wave and Q-switched mode-locked regimes was reported. A stable continuous wave mode-locked pulse train at a repetition rate of 17 MHz was achieved by using a ring cavity configuration at 95 mW incident pump power, the pulse width, central wavelength and 3 dB spectral bandwidth are 130 ps, 1 067.06 nm and 0.27 nm. Stable Q-switched mode-locked pulse train occurred at 280 mW incident pump power. As the pump power varied from 280 mW to 400 mW, the repetition rate of Q-switched envelope varied from 26.51 to 48.7 kHz, and the width of Q-switched envelope varied from 14.6  $\mu\text{s}$  to 4.1  $\mu\text{s}$ , the pulse width and the central wavelength remained invariant. The 3 dB spectral bandwidth was 0.62 nm.

**Key words:** Laser; Passively mode-locked fiber laser;  $\text{MoO}_3$ ; Yb-doped mode-locked fiber laser; Mode-locked

**OCIS Codes:** 140.3615; 140.3538; 140.4050; 060.3510; 060.2320

## 0 引言

锁模光纤激光器具有时域脉宽窄、峰值功率高、光束质量好、结构紧凑等优点,被广泛应用于精细加工、光纤传感、光谱学、生物化学研究等诸多领域.产生锁模脉冲的方法有主动锁模<sup>[1]</sup>和被动锁模<sup>[2]</sup>.被动锁模光

基金项目:国家自然科学基金(No.11304277)资助

第一作者:江俊林(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤激光器. Email:21530051@zju.edu.cn

导师(通讯作者):沈永行(1965-),男,教授,博士,主要研究方向为光纤激光器、光纤传感器. Email:physyh@zju.edu.cn

收稿日期:2018-03-21;录用日期:2018-05-15

<http://www.photon.ac.cn>

纤激光器具有结构紧凑、成本低廉和设计灵活等优点,常见的被动锁模方式有可饱和吸收体锁模、非线性环形镜锁模<sup>[3-4]</sup>和非线性偏振旋转效应锁模<sup>[5-6]</sup>等.锁模状态有连续锁模和调Q锁模,当一些应用领域要求连续的脉冲能量和高重复频率时,需要连续锁模光纤激光器,而工作在调Q锁模状态的光纤激光器具有渐增的脉冲能量和相对更高的峰值功率,可以应用于非线性频率转化、光参量振荡器(Optical Parametric Oscillator, OPO)和微结构加工等领域.

可饱和吸收体锁模主要是利用可饱和吸收材料的非线性吸收特性,对光脉冲产生周期性的调制实现锁模.传统的可饱和吸收体主要有半导体可饱和吸收镜(Semiconductor Saturable Absorber Mirrors, SESAMs)<sup>[7-8]</sup>、碳纳米管(Carbon Nanotubes, CNTs)<sup>[9-10]</sup>和石墨烯<sup>[11]</sup>, SESAMs的制作工艺较为复杂,生产成本较高,可饱和吸收光谱范围较窄,这限制了它的使用.碳纳米管和石墨烯制备成本较为低廉,可饱和吸收光谱范围宽,因此被广泛用作锁模器件,但在制备过程参数具有不可控性,如石墨烯的层数均匀性、CNTs的直径等.近年来,具有非线性吸收特性的新型材料被用来制备可饱和吸收体,如黑磷、拓扑绝缘体( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ )<sup>[12-13]</sup>和过渡金属硫化物( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{SnS}_2$ )<sup>[14-15]</sup>等,这些材料具有较宽的可饱和吸收光谱范围、可控的调制深度、超快的恢复时间且易于制备等诸多优点.2014年, SOTOR J等<sup>[16]</sup>首次报道了以 $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ 为可饱和吸收体的掺铒光纤激光器.2015年, CHEN等<sup>[17]</sup>报道了以黑磷作为新型可饱和吸收体,实现了调Q和锁模脉冲输出.2017年, LI等<sup>[18]</sup>报道了将以聚乙烯醇为基质的 $\text{SnS}_2$ 薄膜作为可饱和吸收体,实现了重复频率为39.33 MHz、脉宽为656 ps、中心波长为1 062.33 nm的锁模脉冲输出.

本文将聚乙烯醇为基质的 $\text{MoO}_3$ 二维纳米片薄膜作为新型材料应用于锁模光纤激光器,该材料具有较好的可饱和吸收特性、调制深度易于控制、制备较为简单等优点.实验中在1.06  $\mu\text{m}$ 处测试了可饱和吸收体的调制深度约为5%,非饱和吸收损耗约为30%,采用环形腔结构,实现了脉冲宽度为130 ps、中心波长为1 067 nm、具有稳定的连续锁模和调Q锁模脉冲输出的掺铒光纤激光器.在泵浦功率为95~235 mW时,获得了重复频率为17 MHz的连续锁模脉冲.在泵浦功率为280~400 mW时,调Q锁模脉冲包络的重复频率在26.51~48.7 kHz之间可调,包络半高宽在14.6~4.1  $\mu\text{s}$ 之间变化.

## 1 实验装置

图1为 $\text{MoO}_3$ 可饱和吸收体实物图及其在扫描电镜下的图片.实验中采用液相剥离法制备二维 $\text{MoO}_3$ 纳米片的过程为:首先将3g  $\text{MoO}_3$ 粉末在0.6 mL乙腈中充分研磨30 min,再将粉末分散在体积分数各为50%的乙醇/水混合液体(45 mL)中,在超声波清洗机中振荡10 min以分散均匀;然后进行超声破碎处理120 min,在室温下以6 000 rpm离心20 min;对包含有二维 $\text{MoO}_3$ 纳米片的上清液进行收集,在小容器中逐滴加入3mL上清液得到样品,最后将样品放在氙灯下进行照射.这种制备方法具有制备简单、无杂质、重复性好、易于大量生产等特点,并且对绝大多数层状晶体结构材料都起作用.

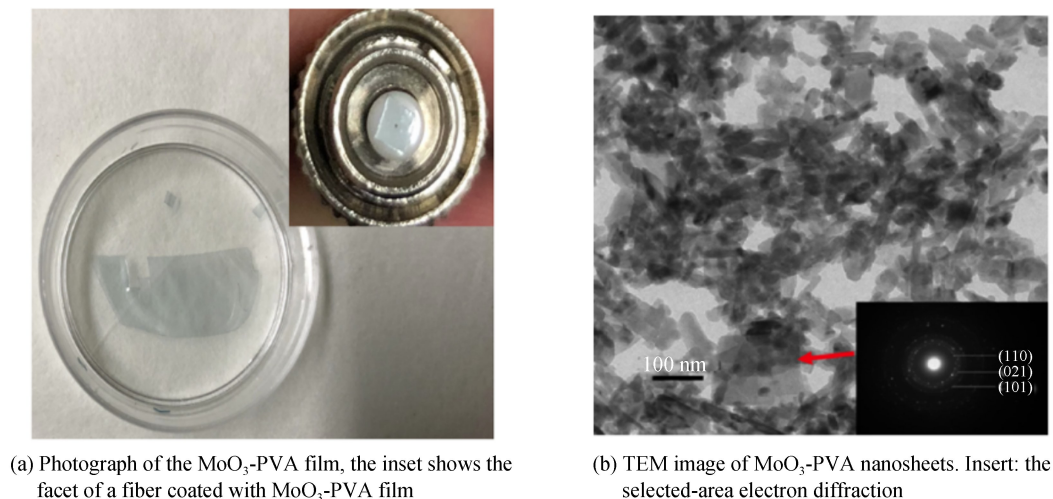


图1  $\text{MoO}_3$ 可饱和吸收体实物图及其在扫描电镜下的图片  
Fig.1 The photograph and the TEM image of the  $\text{MoO}_3$  saturable absorber

如图 2(a)为 MoO<sub>3</sub>纳米片的喇曼光谱,可观测到 280、667、816 和 991 cm<sup>-1</sup>四个强喇曼峰,与  $\alpha$ -MoO<sub>3</sub> 相符合<sup>[19]</sup>. 实验中用中心波长为 1.06  $\mu$ m 的测试光源在不同入射光功率密度下测试了 MoO<sub>3</sub>可饱和吸收体的透射率变化,得到 MoO<sub>3</sub>的调制深度约为 5%,非饱和吸收损耗约为 30%,如图 2(b)所示.

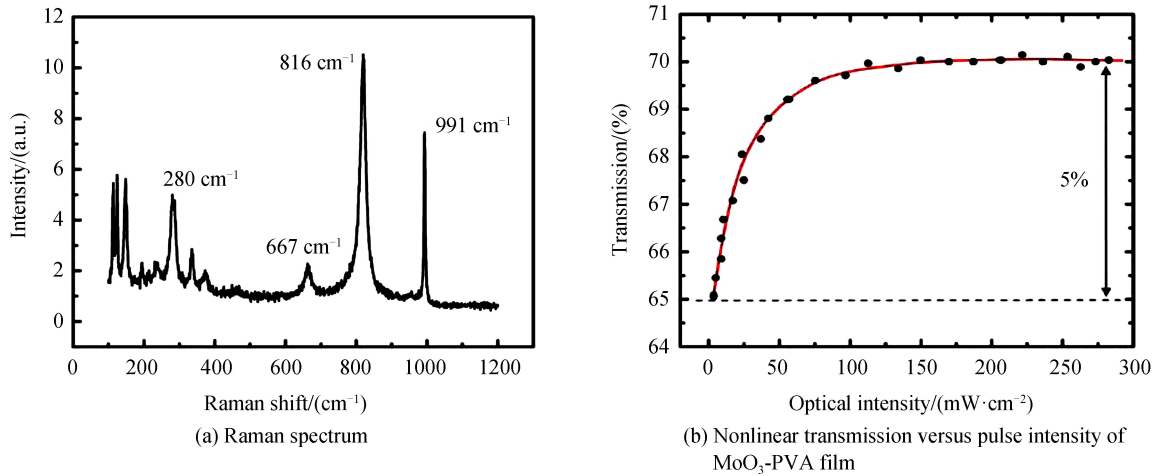


图 2 MoO<sub>3</sub>可饱和吸收体的喇曼光谱及其透射率曲线  
Fig.2 The Raman spectrum and transmission curve of the MoO<sub>3</sub> saturable absorber

图 3 为 MoO<sub>3</sub>被动锁模光纤激光器的实验装置.泵浦源是带单模尾纤输出、中心波长为 974.5 nm 的半导体激光器(Oclaro 公司),调节驱动电流,最大输出功率为 400 mW,通过 976/1 064 波分复用器(Wavelength Division Multiplex, WDM)将泵浦光耦合入环形腔.增益光纤是 Coractive 公司生产的 Yb401 型号掺镱单包层光纤,长度为 0.5 m,芯径为 6  $\mu$ m,包层直径为 125  $\mu$ m,吸收系数为 140 dB/m.光隔离器(Isolator, ISO)保证了光在环形腔内的单向传播.用 10 : 90 的耦合器进行信号输出(10%一端用于输出,90%的一端反馈回激光腔内),法兰盘连接着两端的光纤跳线,将以聚乙烯醇为基质的 MoO<sub>3</sub>薄膜放在一端的光纤跳线端面,这样光从一端的 FC 接头经过可饱和吸收体耦合进另一端 FC 接头.偏振控制器(Polarization Controller, PC)可用于调节光的偏振态,优化激光输出,激光器的总腔长约为 12.2 m.

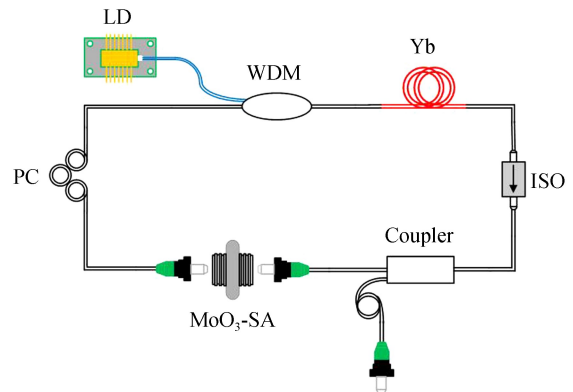


图 3 MoO<sub>3</sub>掺镱锁模光纤激光器装置  
Fig.3 Schematic setup of MoO<sub>3</sub> mode-locked ytterbium-doped fiber laser

## 2 实验结果及分析

为了检测被动锁模是否由 MoO<sub>3</sub>可饱和吸收体作用而产生,实验开始未将 MoO<sub>3</sub>可饱和吸收体放入环形腔中时,当泵浦功率大约在 80 mW 时,激光器开始输出连续光,调节偏振控制器状态和逐渐增加泵浦功率至 400 mW,没有锁模脉冲序列产生.实验中分辨率为 0.01 nm 的 AQ6317 光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzers, OSA)进行光谱测量,带宽为 20 GHz 的 InGaAs 红外光电探测器和 Tektronix 公司的数字示波器(型号为 DSA71254,带宽为 12.5 GHz,采样率为 50 GS/s)进行脉冲测量.

### 2.1 连续锁模

当饱和吸收体放入腔中时,增加泵浦源的泵浦功率至 95 mW,调节偏振控制器到某一角度时,产生稳定的自启动锁模脉冲序列,此时激光器输出功率为 0.70 mW,转换效率为 0.73%.在测试脉冲序列时采样频率设置为 20 GS/s,根据锁模原理中腔长  $L$  与频率  $f$  的关系  $f=c/nL$  ( $c$  表示真空中的光速,  $n$  表示传输介质的折射率),可以得到在腔长为 12.2 m 时,对应锁模基频为 17 MHz.

由图 4(c) 可以看到锁模脉冲间隔为 58.9 ns (对应 17 MHz 的基频), 观察可知在 2 h 内, 脉冲波形输出较为稳定, 脉冲间隔基本相等, 在脉冲幅度上稍微会有点抖动, 但多个脉冲幅度抖动不大, 此时激光器工作在连续锁模状态. 分析认为: 之所以脉冲峰值有一定的抖动, 是因为示波器采样频率不够, 导致有时候无法采样到脉冲最高点. 此外, 温度、振动、泵浦功率波动等因素都会对腔长造成一定的影响, 会导致脉冲重复频率发生微小的改变, 所以脉冲间隔会有一定抖动. 如图 4(a) 和 (b) 所示, 单脉冲宽度为 130 ps, 光谱中心波长为 1 067.06 nm, 谱线 3 dB 带宽为 0.27 nm. 当泵浦光功率在 95~235 mW 时, 相应的输出功率在 0.70~5.25 mW 之间变化, 均可保持较为稳定的锁模脉冲序列输出, 脉冲宽度一直保持在 130 ps (由于示波器采样频率的限制, 能测量的脉宽达到了极限, 实际脉冲宽度可能会更小), 通过光谱仪观察, 光谱形状基本稳定.

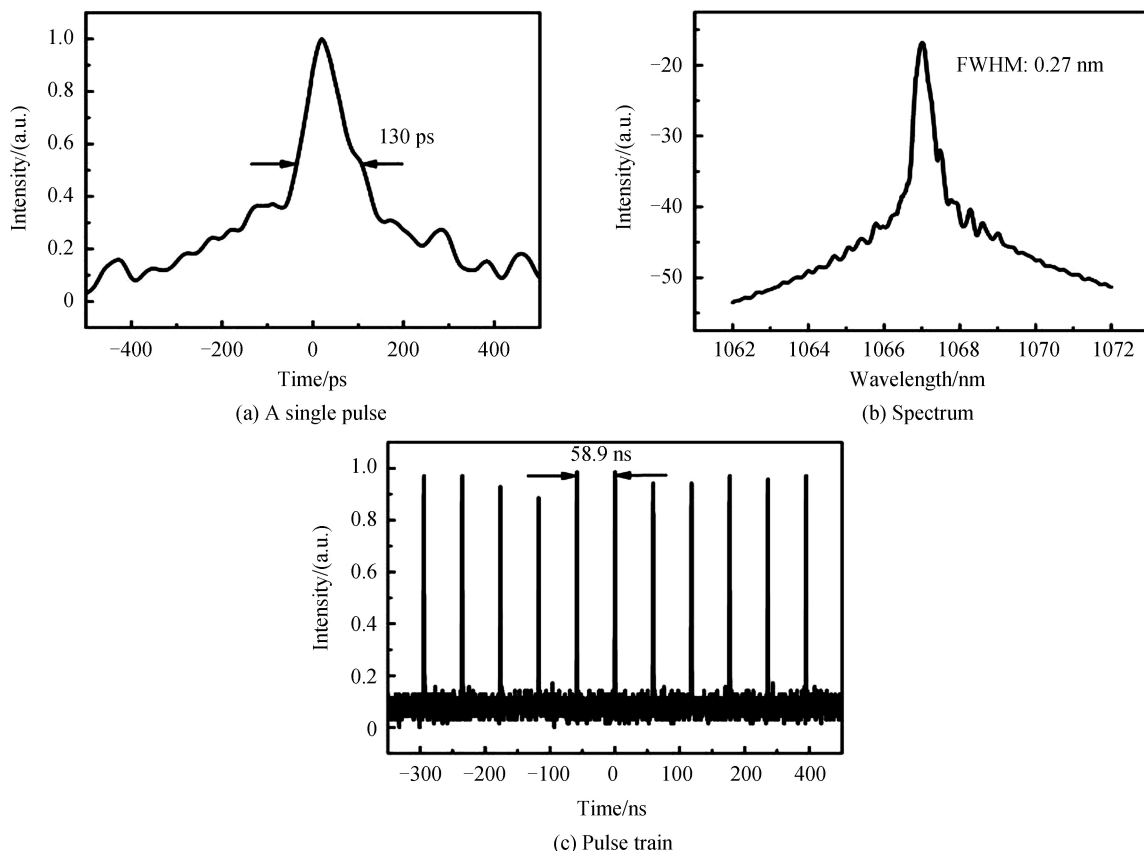


图 4 连续锁模的单脉冲图、光谱图和脉冲序列图

Fig.4 A single pulse, spectrum and pulse train at continuous wave mode-locking

## 2.2 调 Q 锁模

当继续增加泵浦功率, 锁模脉冲输出变得不稳定, 当泵浦功率升至 280 mW, 同时微调偏振控制器, 环形腔中产生稳定的调 Q 锁模脉冲序列. 图 5(a) 和 (b) 展示了在泵浦功率为 340 mW 时, 调 Q 锁模的脉冲序列形状. 此时相邻脉冲包络的时间间隔为 25.8  $\mu$ s (相应于重复频率为 38.76 kHz), 包络半高宽为 6.8  $\mu$ s, 调节示波器的显示范围, 可以看到隐藏在调 Q 脉冲包络中的锁模子脉冲, 锁模子脉冲的宽度基本保持 130 ps 不变, 子脉冲间隔为 58.9 ns, 重复频率为 17 MHz, 与腔长符合. 图 5(c) 是调 Q 锁模时的光谱图, 中心波长为 1 067 nm, 谱线的 3 dB 带宽为 0.62 nm, 比锁模时的光谱宽度更宽, 变宽的原因可能是调 Q 锁模脉冲宽度变窄, 但由于示波器测量脉宽达到了极限, 无法准确地测出其宽度.

当泵浦功率从 280 mW 增加到 400 mW 时, 激光器始终保持在调 Q 锁模状态, 如图 6(a) 所示, 输出功率从 6.28 mW 增加到 11.02 mW. 图 6(b) 为调 Q 锁模包络重复频率及包络宽度随泵浦功率的变化曲线, 调 Q 包络重复频率从 26.51 kHz 变化到 48.7 kHz, 包络半高宽从 14.6  $\mu$ s 变化到 4.1  $\mu$ s, 包络变化符合调 Q 脉冲变化趋势, 而子脉冲间隔不变. 在整个调 Q 锁模过程中, 光谱的中心波长始终保持在 1 067 nm 左右,

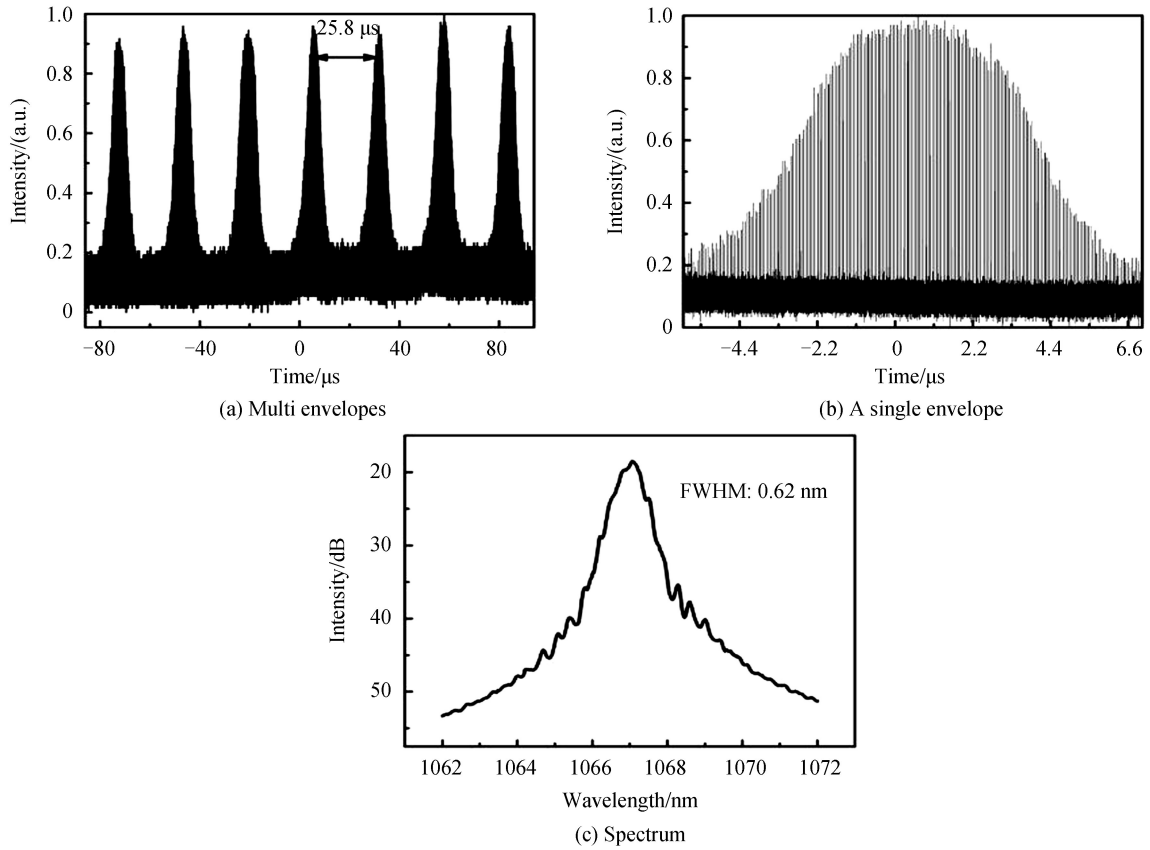


图 5 调 Q 锁模时多个脉冲包络, 单个脉冲包络和光谱

Fig.5 Multi pulse and single pulse envelope as well as the spectrum at Q-switched mode-locking

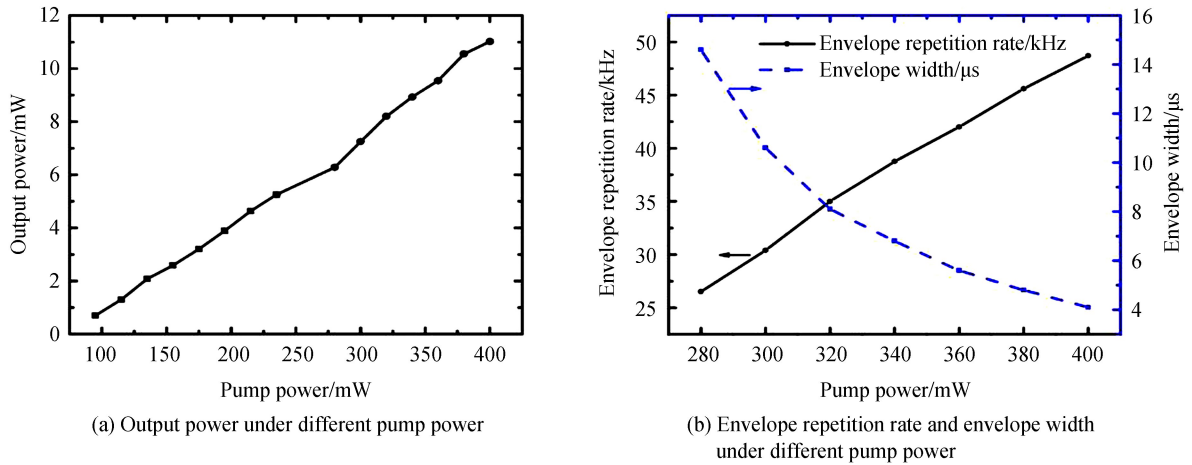


图 6 不同泵浦功率下的输出功率、调 Q 包络重频和包络宽度

Fig.6 Output power, repetition rate and width of Q-switched envelope under different pump power

随泵浦功率变化不明显。分析认为：从锁模状态变为调 Q 锁模状态的原因是由于在泵浦功率增加的情况下，单脉冲能量增加，光纤锁模向另一种锁模状态转变，而调 Q 锁模是一个过渡状态，更高功率下可能仍会出现连续锁模，另一种锁模态的细节目前尚不清楚，分析可能需要更大的单脉冲能量支持其稳定锁模，这部分工作将在后续开展。

### 3 结论

报道了一种基于 MoO<sub>3</sub> 纳米片薄膜为可饱和吸收体的掺镱被动锁模光纤激光器。采用调制深度约为 5%，非饱和吸收损耗约为 30% 的 MoO<sub>3</sub> 纳米片薄膜作为可饱和吸收体，获得了脉宽为 130 ps、中心波长为

1 067 nm 的连续锁模、调 Q 锁模脉冲输出。在泵浦功率为 95~235 mW 时, 激光器工作在连续锁模状态, 重复频率为 17 MHz, 相应的输出功率为 0.70~5.25 mW。在泵浦功率为 280~400 mW 时, 调 Q 锁模脉冲包络的重复频率在 26.51~48.7 kHz 之间可调, 包络半高宽在 14.6~4.1  $\mu$ s 之间变化, 相应的输出功率为 6.28~11.02 mW。这些研究结果表明利用 MoO<sub>3</sub> 可饱和吸收体的非线性吸收特性可以实现光纤激光器的锁模脉冲运转。

#### 参考文献

- [1] O'NEIL J J, KUTZ J N, SANDSTEDTE B, *et al.* Theory and simulation of dynamics and stability of actively modelocked lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2002, **38**(10): 1412-1419.
- [2] ZHANG Y, ZHU J Q, LI P X, *et al.* All-fiber Yb-doped fiber laser passively mode-locking by monolayer MoS<sub>2</sub> saturable absorber[J]. *Optics Communications*, 2018, **4**(13): 236-241.
- [3] RUDY C W, URBANEK K E, DIGONNET M J F, *et al.* Amplified 2  $\mu$ m Thulium-doped all-fiber mode-locked figure-eight laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(11): 1809-1812.
- [4] WEN Ru-hua, HU Cheng-zhi, WEI Kai-hua, *et al.* All-PM "Figure of eight" cavity mode-locked fiber laser and its power amplification[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(5): 0506002.  
温如华, 胡澄之, 魏凯华, 等. 基于全保偏八字腔结构锁模的光纤激光器及其功率放大[J]. 光子学报, 2017, **46**(5): 0506002.
- [5] YAN Zhi-yu, LI Xiao-hui, TANG Yu-long, *et al.* Tunable and switchable dual-wavelength Tm-doped mode-locked fiber laser by nonlinear polarization evolution[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(4): 4369-4376.
- [6] LIU Peng, WANG Tian-shu, ZHANG Peng, *et al.* Multi-wavelength thulium-doped mode-locking fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(6): 0614003.  
刘鹏, 王天枢, 张鹏, 等. 基于非线性偏振旋转效应的多波长掺铥锁模光纤激光器[J]. 光子学报, 2016, **45**(6): 0614003.
- [7] MAAS D J H C, RUDIN B, RUDIN B A R, *et al.* High precision optical characterization of semiconductor saturable absorber mirrors[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(10): 7571-7579.
- [8] WANG Jing, ZHANG Hong-ming, ZHANG Jun, *et al.* Passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(2): 163-165.  
王旌, 张洪明, 张鋆, 等. 基于饱和吸收镜的被动锁模光纤激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(2): 163-165.
- [9] LIU J, WANG Y G, QU Z H, *et al.* 2  $\mu$ m passive Q-switched mode-locked Tm<sup>3+</sup>: YAP laser with single-walled carbon nanotube absorber[J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, **44**(4): 960-962.
- [10] CHENG K N, LIN Y H, LIN G R, *et al.* Single- and double-walled carbon nanotube based saturable absorbers for passive mode-locking of an erbium-doped fiber laser[J]. *Laser Physics*, 2013, **23**(4): 5105-5110.
- [11] BAO Q, ZHANG H, WANG Y, *et al.* Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2009, **19**(19): 3077-3083.
- [12] JUNG M, LEE J, KOO J, *et al.* A femtosecond pulse fiber laser at 1935 nm using a bulk-structured Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> topological insulator [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(7): 7865-7874.
- [13] ZHAO C J, ZHANG H, QI X, *et al.* Ultra-short pulse generation by a topological insulator based saturable absorber [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**(21): 1106.
- [14] TIAN Z, WU K, KONG L C. Mode-locked thulium fiber laser with MoS<sub>2</sub> [J]. *Laser Physics Letters*, 2015, **12**(6): 065104.
- [15] WU K, ZHANG X Y, WANG J, *et al.* WS<sub>2</sub> as a saturable absorber for ultrafast photonic applications of mode-locked and Q-switched lasers[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(9): 11453-11461.
- [16] SOTOR J, SOBON G, MACHERZYNSKI W, *et al.* Mode-locking in Er-doped fiber laser based on mechanically exfoliated Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> saturable absorber[J]. *Optical Materials Express*, 2014, **4**(1): 1-6.
- [17] CHEN Y, JIANG G, CHEN S, GUO Z, *et al.* Mechanically exfoliated black phosphorus as a new saturable absorber for both Q-switching and Mode-locking laser operation[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(10): 12823-12833.
- [18] LI Jian, ZHAO Yue-feng, CHEN Qing-yun, *et al.* Passively mode-locked ytterbium-doped fiber laser based on sns<sub>2</sub> as saturable absorber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **9**(6): 462-470.
- [19] LIU D, LEI W W, HAO J, *et al.* High-pressure Raman scattering and x-ray diffraction of phase transitions in MoO<sub>3</sub> [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **105**(2): 023513.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No.11304277)

引用格式: JIANG Jun-lin, YUE Wen-jie, WANG Wei-qi, *et al.* Passively Mode-locked Ytterbium-doped Fiber Laser Based on MoO<sub>3</sub> as Saturable Absorber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(9): 0914001

江俊林, 乐文杰, 王玮琦, 等. 基于 MoO<sub>3</sub> 可饱和吸收体的掺铈被动锁模光纤激光器[J]. 光子学报, 2018, **47**(9): 0914001