

反射式二硫化钼可饱和吸收体实现 Nd:YVO₄激光器的调 Q 和调 Q 锁模输出的调 Q 和调 Q 锁模输出

李平雪¹ 张光举¹ 张 晗² 赵楚军² 池俊杰¹ 胡浩伟¹ 姚毅飞¹ 苏 宁¹

¹北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124

²深圳大学 光电工程学院, 广东 深圳 518060

摘要 本文报道了利用反射式二硫化钼作为可饱和吸收体, 实现了 Nd:YVO₄ 激光器的调 Q 和调 Q 锁模输出。Nd:YVO₄ 激光系统采用了折叠腔结构。在吸收抽运功率为 4.47 W 时, 得到了输出功率为 87.2 mW 的调 Q 脉冲输出。在吸收抽运功率为 4.75 W 时, 得到了输出功率为 95.3 mW 的调 Q 锁模脉冲输出。输出超短脉冲的中心波长为 1064.39 nm。本文对实验结果及现象进行了分析和讨论, 为下一步的实验作了准备工作。

关键词 激光器; Nd:YVO₄; 二维材料; 二硫化钼; 被动调 Q

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s114003

Q-Switched and Q-Switched Mode-Locking Operation from Nd:YVO₄ Laser using Reflective MoS₂ Saturable Absorber

Li Pingxue¹ Zhang Guangju¹ Zhang Han² Zhao Chujun² Chi Junjie¹
Hu Haowei¹ Yao Yifei¹ Su Ning¹

¹Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

²College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract The generation of both Q-switched and Q-switched mode-locking pulses from Nd:YVO₄ laser using reflective MoS₂ saturable absorber is reported. The Nd:YVO₄ laser system is designed as a folded cavity. At the absorbed pump power of 4.47 W, Q-switched pulses with average output power of 87.2 mW are obtained. The Q-switched mode-locking operation with average output power of 95.3 mW is achieved at the absorbed pump power of 4.75 W. The wavelength of the ultrashort pulses is centered at 1064.39 nm. The experimental results are analyzed, and a good preparation is made for the next-step work.

Key words lasers; Nd:YVO₄; two-dimension layered materials; MoS₂; passive Q-switched

OCIS codes 140.3540; 140.3580; 160.4330; 320.7090

1 引 言

超短脉冲激光因其具有极高的峰值功率、极窄的脉冲宽度和较宽的光谱宽度, 在生物医学、激光加工制造和物理化学研究等领域都有着重要的应用。在过去的二十年中, 科学家提出并发展了利用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 作为可饱和吸收体的被动锁模方法, 用来获得超短脉冲激光输出^[1-4]。但是, 由于 SESAM 存在损伤阈值低、作用波长范围小、制备复杂和造价高等缺点, 其应用前景受到了限制。

近年来, 以石墨烯、拓扑绝缘体和二硫化钼 (MoS₂) 为代表的二维材料逐渐显示出了作为新一代可饱和吸收体的前景。目前, 针对石墨烯和拓扑绝缘体可饱和吸收性的研究已经有了一系列的报道^[5-16], 而对于二

收稿日期: 2015-01-30; 收到修改稿日期: 2015-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(61205047)

作者简介: 李平雪(1974—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子技术及激光技术等方面的研究。

E-mail: pxli@bjut.edu.cn

硫化钼的相关研究还处在初级阶段。在 2014 年的 3 月, Zhang 等^[17] 首先报道了他们利用二硫化钼作为可饱和吸收体, 以掺铋光纤为增益介质的纳秒级锁模超短脉冲激光器。其中心波长为 1054.3 nm, 光谱宽度为 2.7 nm, 脉冲宽度为 800 ps。同年, Wang 等^[18] 以二硫化钼作为可饱和吸收体, 从以 Nd:GdVO₄、Nd:YGG 和 Tm:Ho:YGG 为增益介质的固体激光器中分别获得了中心波长为 1.06、1.42 和 2.1 μm 的调 Q 脉冲输出。Ren 等^[19] 利用二硫化钼掺铋光纤激光器实现了纳秒级的调 Q 脉冲输出, 脉宽可以达到 660 ns, 中心波长为 1.5 μm。Xu 等^[20] 也从 Nd:YAlO₃ 和掺铋光纤激光器中利用二硫化钼分别获得了调 Q 脉冲输出, 其中 Nd:YAlO₃ 激光器的中心波长为 1079.5 nm, 而掺铋光纤激光器的中心波长可以实现 1519.6~1567.7 nm 范围的可调谐性^[21]。Liu 等^[22-23] 实现了掺铋光纤二硫化钼激光器的飞秒和皮秒锁模激光器的输出, 脉宽分别为 710 fs 和 3 ps, 中心波长分别为 1569.5 和 1556.86 nm。Xia 等^[24] 利用二硫化钼为可饱和吸收体的掺铋激光器获得了脉宽为 1.28 ps 锁模脉冲输出, 中心波长为 1568.9 nm。英国剑桥大学的 Woodward 等^[25] 在掺铋光纤激光器中, 通过利用二硫化钼作为可饱和吸收体, 实现了中心波长在 1030~1070 nm 范围可调谐的调 Q 脉冲输出, 脉冲宽度可达到 2.88 μs。韩国延世大学的 Khazaeizhad 等^[26] 利用二硫化钼, 分别从正色散和负色散的掺铋光纤激光器中获得锁模脉冲输出, 脉宽分别为 4.98 ps 和 637 fs, 中心波长分别为 1563 nm 和 1568 nm。

在对二维材料的可饱和吸收体的研究中, 本实验室主要尝试在掺杂 Nd³⁺ 固体激光器中利用二维材料做可饱和吸收体实现超短脉冲的输出。例如, 通过在 Nd:YVO₄ 激光器中引入反射式拓扑绝缘体材料可饱和吸收体, 本课题组已经报道了 1064 nm 的调 Q 和调 Q 锁模激光输出^[27]。本文将介绍利用反射式二硫化钼可饱和吸收体实现调 Q 和调 Q 锁模输出的 Nd:YVO₄ 超短脉冲激光器。而且, 尚未见到利用二硫化钼作为可饱和吸收体实现 Nd:YVO₄ 激光器的超短脉冲输出报道。

2 实验装置

为了制备实验中应用的二硫化钼样品, 采用了一种水热插层剥离处理的制备方法, 其详细的制备过程见文献^[17]。与传统的化学气相沉积法、高温硫化法和机械研磨法等方法相比, 采用的方法可以较为方便而低廉地制备样品。图 1(a) 是样品的拉曼光谱图, 并且从图中可见, 样品的拉曼光谱在 383.2 cm⁻¹ 和 408.1 cm⁻¹ 处分别对应了 E_{2g}¹ 和 A_{1g} 两个特征峰。图 1(b) 是样本的扫描电子显微镜 (SEM) 成像图, 从图可知, 本组制备的二硫化钼样品呈现出具有少数层的类二维片状结构。

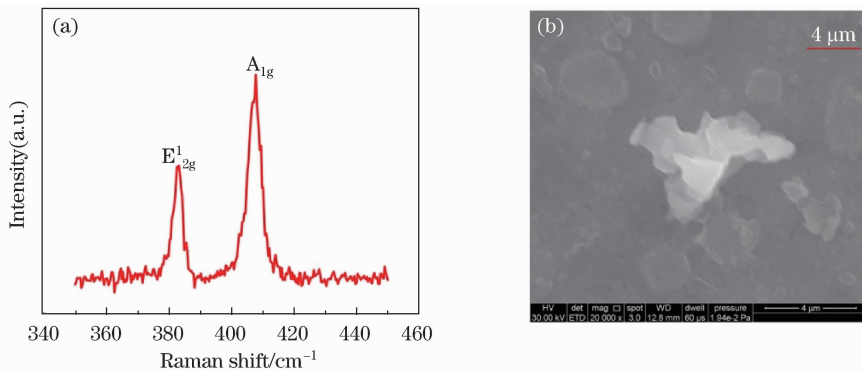


图 1 (a) 二硫化钼样品的拉曼光谱图; (b) 二硫化钼样品的 SEM 扫描成像图

Fig. 1 (a) Raman spectra of MoS₂ sample; (b) SEM image of MoS₂ sample

本实验采用的是折叠腔结构的激光系统, 实验装置如图(2)所示。采用的是沿 a 向切割的 Nd:YVO₄ 晶体, 其中 Nd³⁺ 掺杂原子数分数为 0.6%, 尺寸为 4 mm×4 mm×8 mm。晶体先由铝箔包裹, 之后放在热沉上通水冷却, 水温保持在 16 ℃。采用的半导体激光器 (LD) 抽运源的工作波长为 808 nm, 其输出尾纤的芯径为 400 μm, 数值孔径为 0.22。抽运光经 1:1 的耦合系统以 400 μm 的光斑直径聚焦到晶体上。M1 是一块对 808 nm 光高透、对 1064 nm 光高反的分光镜。M2、M3、M4 是 3 块曲面镜, 对应的曲率半径分别为 600、500 和 400 mm, 并且全部对 808 nm 光高透、对 1064 nm 光高反。反射式二硫化钼可饱和吸收体同时作为腔镜,

对 1064 nm 光的透射率为 5% 的输出耦合镜(OC)也作为另一块腔镜。谐振腔总长度大约为 2.34 m。为了检测输出激光时域状态,采用了带宽为 150 MHz 的快速光电探头(Thorlabs PDA10CF)和带宽为 500 MHz 的示波器(Rigol DS4054)。输出激光的光谱由 YOKOGAWA 公司生产的型号为 AQ6370D 的光谱仪检测,其分辨率为 0.02 nm。

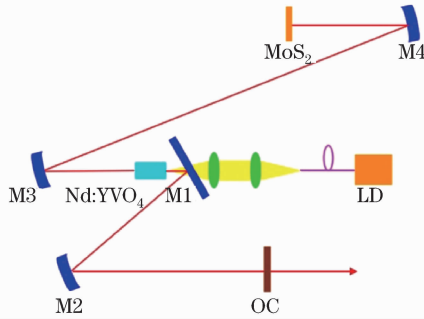


图 2 实验装置图

Fig. 2 Image of experimental setup

3 实验结果与讨论

在将二硫化钼样品置入激光腔内之前,仅采用一块对 1064 nm 激光高反的平面镜作为腔镜,并检测输出激光的时域状态。随着抽运源功率由低到高增加,输出激光一直保持在时域上的连续运转状态,这证明了此时的激光系统中不存在任何对激光的调制因素。然后,采用具有反射衬底的二硫化钼样品替代平面镜。当吸收抽运功率达到 2.31 W 时,激光系统开始输出激光,但其在时域上显示出十分不稳定的状态。随着吸收抽运功率增加到 4.47 W,示波器上显示出调 Q 状态。调 Q 脉冲的重复频率可达 135.1 kHz,其半峰全宽可达 2.5 μ s,输出功率为 87.2 mW。这里需要指出,调 Q 脉冲的重复频率与半峰全宽的值都是统计平均值,因为此时的调 Q 状态并不十分稳定。图(3)展示的是在 4.47 W 的吸收抽运功率时的调 Q 脉冲序列图。当吸收抽运功率达到 4.75 W 时,输出激光又显示出调 Q 锁模的状态,输出功率达到了 95.3 mW,其脉冲序列图如图 4 所示,光谱如图 5 所示,其光谱宽度(3 dB 带宽)大约为 0.04 nm。随着抽运源功率的进一步增加,

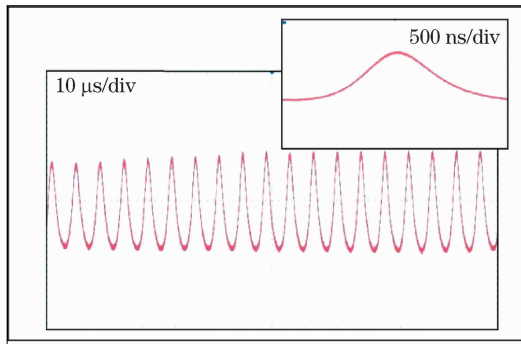


图 3 4.47 W 吸收抽运功率下的调 Q 脉冲序列图

Fig. 3 Image of Q-switched pulse trains at absorbed pump power of 4.47 W

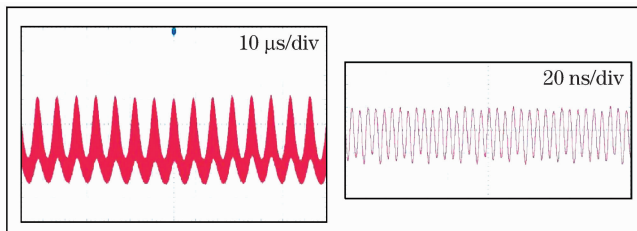


图 4 4.75 W 吸收抽运功率下调 Q 锁模脉冲序列图

Fig. 4 Image of Q-switched mode-locking pulse trains at absorbed pump power of 4.75 W

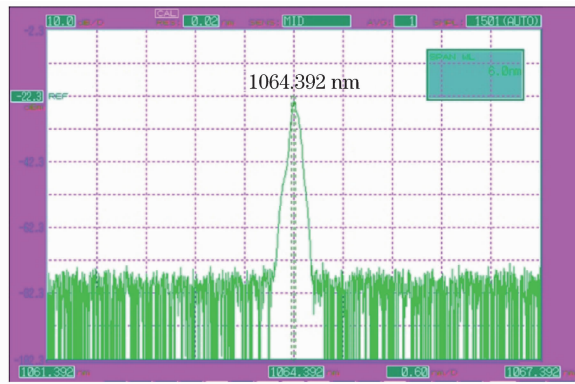


图 5 激光器输出光谱谱线图

Fig. 5 Output spectra of laser

示波器开始显示出非常乱的调制现象。观察了二硫化钼样品的表面,发现已有热损伤出现。

众所周知,对于超短脉冲激光系统而言,可饱和吸收体的质量极大地影响了输出激光的状态。这一点对于全固态激光器而言是尤为明显的,一方面,相对于光纤激光器,全固态激光器对于可饱和吸收体表面的均匀度和面积都有更高的要求。在此激光系统中,照射在可饱和吸收体表面的光斑直径大约为 $100\ \mu\text{m}$,现有的样品制备工艺是无法保证这样大面积的材料具有良好均匀性的。另一方面,不完善的制备工艺也会导致二硫化钼可饱和吸收体的损伤阈值过低。尤其是对于长腔激光系统而言,由于其比较容易产生较高能量的激光脉冲,可饱和吸收体有可能在腔内的脉冲能量达到连续锁模阈值之前就被腔内脉冲激光损坏,从而导致连续锁模无法实现。同时,还应注意到,不完善的制备工艺也会使可饱和吸收体的非饱和损耗较高,加之固体激光介质的增益相对于增益光纤而言又较低,这样就使得固体激光器的腔内脉冲能量较难达到实现稳定连续锁模的阈值。接下来,本课题组将改善样品的制备工艺,随着具有更高质量的二硫化钼样品的制备和应用,利用二硫化钼作为可饱和吸收体的 Nd:YVO₄ 连续锁模激光器将会得以实现。

4 结 论

本文首次尝试将二硫化钼作为可饱和吸收体应用于 Nd:YVO₄ 激光器的超短脉冲输出,实现了中心波长为 1064.39 nm 的调 Q 和调 Q 锁模状态。调 Q 状态下的输出功率为 87.2 mW,对应脉冲重复频率和脉冲半峰全宽的统计平均值分别为 135.1 kHz 和 2.5 μs 。调 Q 锁模状态下,激光的输出功率可达 95.3 mW。实验结果验证了二硫化钼作为可饱和吸收体的应用价值。

参 考 文 献

- 1 Wang Jing, Zhang Hongming, Zhang Jun, *et al.*. Passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(2): 163-165.
王 旌, 张洪明, 张 璠, 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.
- 2 Zhang Zhigang, Chai Lu, Zhao Jiangshan, *et al.*. Semiconductor saturable-absorber mirror for self-starting mode-locked Ti: sapphire lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(9): 1151-1152.
张志刚, 柴 路, 赵江山, 等. 用于钛宝石激光器自启动锁模的半导体可饱和吸收镜[J]. 光学学报, 2002, 22(9): 1151-1152.
- 3 Li Xiao, Wang Yongang, Zhang Shiqiang, *et al.*. Passively mode-locked side-pumped Nd:YAG Laser with SESAM [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3103-3105.
李 霄, 王勇刚, 张世强, 等. 半导体可饱和吸收镜被动锁模侧面抽运 Nd:YAG 激光器研究[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3103-3105.
- 4 Zhang Bingyuan, Wang Guoju, He Jingliang, *et al.*. Passively mode locking of Nd:YVO₄ laser with grin lens as optical coupler [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0714001.
张丙元, 王国菊, 何京良, 等. 自聚焦透镜耦合激光二极管抽运 Nd:YVO₄ 锁模激光器的研究[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0714001.
- 5 L M Zhao, D Y Tang, H Zhang, *et al.*. Dissipative soliton operation of an ytterbium-doped fiber laser mode locked fiber laser mode locked with atomic multilayer graphene [J]. Opt Lett, 2010, 35(21): 3622-3624.
- 6 Xiaoying He, Zhibo Liu, D N Wang. Wavelength-tunable, passively mode-locked fiber laser based on graphene and chirped fiber Bragg grating [J]. Opt Lett, 2012, 37(12): 2394-2396.
- 7 J Liu, Y G Wang, Z S Qu, *et al.*. Graphene oxide absorber for 2 μm passive mode-locking Tm:YAlO₃ laser [J]. Laser Phys Lett, 2012, 9(1): 15-19.
- 8 A A Lagatsky, Z Sun, T S Kulmala, *et al.*. 2 μm solid-state laser mode-locked by single-layer graphene [J]. Appl Phys Lett, 2013,

- 102(1): 013113.
- 9 N Tolstik, E Sorokin, I T Sorokina. Graphene mode-locked Cr: ZnS laser with 41 fs pulse duration[J]. *Opt Express*, 2014, 22(5): 5564-5571.
- 10 C J Zhao, Y H Zou, Y Chen, *et al.*. Wavelength-tunable picosecond soliton fiber laser with topological insulator: Bi₂Se₃ as a mode locker [J]. *Opt Express*, 2012, 20(25): 27888-27895.
- 11 J Lee, J Koo, Y M Jhon, *et al.*. A femtosecond pulse erbium fiber laser incorporating a saturable absorber based on bulk-structured Bi₂Te₃ topological insulator[J]. *Opt Express*, 2014, 22(5): 6165-6173.
- 12 J Sotor, G Sobon, W Macherzynski, *et al.*. Mode-locking in Er-doped fiber laser based on mechanically exfoliated Sb₂Te₃ saturable absorber[J]. *Opt Mater Express*, 2014, 4(1): 1-6.
- 13 M Jung, J Lee, J Koo *et al.*. A femtosecond pulse fiber laser at 1935 nm using a bulk-structured Bi₂Te₃ topological insulator[J]. *Opt Express*, 2014, 22(7): 7865-7874.
- 14 Y Chen, C J Zhao, H H Huang, *et al.*. Self-assembled topological insulator: Bi₂Se₃ membrane as a passive Q-switcher in an erbium-doped fiber laser[J]. *J Lightwave Technol*, 2013, 31(17): 2857-2863.
- 15 Z Q Luo, Y Z Huang, J Weng, *et al.*. 1.06 μm Q-switched ytterbium-doped fiber laser using few-layer topological insulator Bi₂Se₃ as a saturable absorber[J]. *Opt Express*, 2013, 21(24): 29516-29522.
- 16 P H Tang, X Q Zhang, C J Zhao, *et al.*. Topological Insulator: Bi₂Te₃ saturable absorber for the passive Q-switching operation of an in-band pumped 1645-nm Er:YAG ceramic laser[J]. *IEEE Photon J*, 2013, 5(2): 1500707.
- 17 H Zhang, S B Lu, J Zheng, *et al.*. Molybdenum disulfide (MoS₂) as a broadband saturable absorber for ultra-fast photonics[J]. *Opt Express*, 2014, 22(6): 7249-7260.
- 18 S X Wang, H H Yu, H J Zhang, *et al.*. Broadband few-layer MoS₂ saturable absorbers[J]. *Adv Mater*, 2014, 26(21): 3538-3544.
- 19 Jun Ren, Shuxian Wang, Zhaochen Cheng, *et al.*. Passively Q-switched nanosecond erbium-doped fiber laser with MoS₂ as saturable absorber[J]. *ASSL 2014: ATH2a*. 31.
- 20 B Xu, Y J Cheng, Y Wang, *et al.*. Passively Q-switched Nd:YAlO₃ nanosecond laser using MoS₂ as saturable absorber[J]. *Opt Express*, 2014, 22(23): 28934-28940.
- 21 Y Z Huang, Z Q Luo, Y Y Li, *et al.*. Widely-tunable, passively Q-switched erbium-doped fiber laser with few-layer MoS₂ saturable absorber[J]. *Opt Express*, 2014, 22(21): 25258-25266.
- 22 H Liu, A P Luo, F Z Wang *et al.*. Femtosecond pulse erbium-doped fiber laser by a few-layer MoS₂ saturable absorber[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(16): 4591-4594.
- 23 M Liu, X W Zheng, Y L Qi, *et al.*. Microfiber-based few-layer MoS₂ saturable absorber for 2.5 GHz passively harmonic mode-locked fiber laser[J]. *Opt Express*, 2014, 22(19): 22841-22846.
- 24 Handing Xia, Heping Li, Changyong Lan, *et al.*. Ultrafast erbium-doped fiber laser mode-locked by a CVD-grown molybdenum disulfide (MoS₂) saturable absorber[J]. *Opt Express*, 2014, 22(14): 17341-17348.
- 25 R I Woodward, E J R Kelleher, R C T Howe, *et al.*. Tunable Q-switched fiber laser based on saturable edge-state absorption in few-layer molybdenum disulfide (MoS₂)[J]. *Opt Express*, 2014, 22(25): 31113-31122.
- 26 R Khazaiezhad, S H Kassani, H Jeong, *et al.*. Mode-locking of Er-doped fiber laser using a multilayer MoS₂ thin film as a saturable absorber in both anomalous and normal dispersion regime[J]. *Opt Express*, 2014, 22(19): 23732-23742.
- 27 P X Li, G J Zhang, H Zhang, *et al.*. Q-switched mode-locked Nd:YVO₄ laser by topological insulator Bi₂Te₃ saturable absorber[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2014, 26(19): 1912-1915.

栏目编辑: 宋梅梅