

新型二硫化钼可饱和吸收体的制备及其超快特性研究

杨闵皓¹, 常建华^{1,2,*}, 石少杭², 杨镇博¹, 刘振兴¹, 戴瑞¹, 丁蓉¹, 林海芝¹

¹南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044;

²南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 江苏 南京 210044

摘要 以二硫化钼(MoS₂)为代表的新型“类石墨烯”二维材料具有带隙可调、调制深度高、宽带可饱和吸收等优点,在超快脉冲激光器中获得了广泛应用。采用锂离子-插层法制备 MoS₂ 纳米片溶液,通过超声、离心、旋涂、干燥等工艺制作了高质量 MoS₂ 可饱和吸收体(SA)。利用拉曼光谱和原子力显微镜等方法对制备的 MoS₂ 薄膜进行了表征,结果表明,该 MoS₂ 薄膜为少层结构(2~3 层)且具有良好的均匀性。将该 MoS₂ SA 置于 W 型全固态激光器系统中,实现了 1063.9 nm 稳定的被动锁模运转。实验中,当吸收抽运功率达到 6.86 W 时,脉冲平均输出功率为 894 mW,单脉冲能量及峰值功率分别为 10.28 nJ 和 2.056 kW,锁模脉冲宽度为 5 ps。

关键词 激光器; 固体激光器; 被动锁模; 二硫化钼可饱和吸收体; 锂离子-插层法

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1001009

Preparation and Study on the Ultrafast Characteristics of a New Type of Molybdenum Disulfide Saturable Absorber

Yang Minhao¹, Chang Jianhua^{1,2,*}, Shi Shaohang², Yang Zhenbo¹, Liu Zhenxing¹,
Dai Rui¹, Ding Rong¹, Lin Haizhi¹

¹*Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;*

²*Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China*

Abstract The new type of graphene like material, represented by molybdenum disulfide (MoS₂), has many advantages of adjustable band gap, high modulation depth, and wide band saturable absorption. It is widely used in ultra-fast pulse laser. The MoS₂ nanoscale solution is obtained by lithium-ion intercalation method. High quality MoS₂ saturated absorber (SA) was prepared by ultrasonic, centrifugation, spin coating and drying. The MoS₂ film is characterized by Raman spectroscopy and atomic force microscopy. The results showed that the film is a few-layer structure (2-3 layer) with good uniformity. The new MoS₂ SA is placed in a W-type all solid state laser system, stable passive mode-locked operation at 1063.9 nm is achieved. When the pump power reached 6.86 W, the average output power of the mode-locked laser is 894 mW, the energy and peak power of monopulse are 10.28 nJ and 2.056 kW, respectively, and the pulse width is 5 ps.

Key words lasers; solid-state laser; passively mode-locked; molybdenum disulphide saturable absorber; lithium-ion intercalation

OCIS codes 140.3580; 140.3380; 140.4050

收稿日期: 2018-04-28; 修回日期: 2018-06-02; 录用日期: 2018-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(11374161,61875089)、江苏省重点研发计划(BE2016756)、江苏高校优势学科 II 期建设工程、江苏省高校品牌专业建设工程资助项目、国家级大学生实践创新训练计划项目(201610300030,201710300015)、江苏省大学生实践创新训练计划项目(201710300077X)、2018 年江苏省研究生实践创新计划(SJ CX18_0321)

* E-mail: jianhuachang@nuist.edu.cn

1 引言

超短脉冲激光因具有时域脉宽窄、频域光谱宽等特点,被广泛应用于光纤通信、光电传感、生物医学等领域。如何获得高功率、高重频、高脉冲能量的激光一直是研究热点。20世纪80~90年代,半导体可饱和吸收镜(SESAM)作为可饱和吸收体(SA)得到了充分发展,利用SESAM在激光器中成功实现了被动调Q/锁模运转^[1-5]。但是,工艺繁琐、成本高、损伤阈值低、作用波长范围窄等缺点限制了SESAM在激光器中的应用。近年来,具有良好可饱和吸收和零带隙特性的石墨烯在超短脉冲激光器中获得成功应用,展现了广阔的应用前景^[6-11]。据报道,二硫化钼(MoS₂)、二硫化钨(WS₂)等新型“类石墨烯”二维材料同样具有可饱和吸收特性、低吸收强度、超快恢复时间等优点,已经在超短脉冲激光领域引起关注^[12-13]。

与石墨烯相比,MoS₂具有独特的“三明治”结构、可调控的能带隙、高导电性、强吸附力、较好的吸收系数等优点,在催化反应、复合材料、场效应晶体管、光电器件等领域应用广泛^[14-16]。Gao等^[17]报道MoS₂纳米片可呈现出很强的可饱和吸收特性;之后,Zhang等^[18]首次将MoS₂作为SA,在光纤激光器中实现了连续锁模激光运转,其中心波长为1054.3 nm,脉冲宽度为800 ps,光谱宽度为2.7 nm。光纤激光器具有极低的体积面积比、出射光斑半径较小、光-光转化效率高、单位面积上的光功率密度在极短时间内更易达到调Q和锁模阈值。同时,光纤激光器对于光纤表面的SA制备质量要求低,腔型结构简单,易于搭建。因此,国内大多数研究者的重点都聚焦在将MoS₂可饱和吸收体(MoS₂ SA)应用于光纤激光器中。2014年,Luo等^[19]利用MoS₂ SA在光纤激光器中实现了1、1.5和2 μm波段的调Q激光输出。2015年,Khazaeizhad等^[20]进一步优化腔型结构,利用掺铒光纤作为增益介质,MoS₂作为SA,获得了中心波长在1563 nm处的调Q脉冲运转,重复频率为26.6~40.9 kHz。随着研究的深入,人们不断尝试改变光纤激光器腔型结构以改变腔长,加入光栅约束腔内起振的纵模数,适当调节抽运功率和偏振控制器的角度等,成功实现了基于MoS₂ SA的光纤激光器被动锁模输出。2016年,Duan等^[21]研究了基于MoS₂ SA的D型光纤激光器锁模脉冲输出及其可饱和吸收特性。2017年,Wang等^[22]将MoS₂ SA应用于Tm掺杂光纤激光

器中,实现了2 μm波段的锁模激光输出。

全固态激光器兼具固体激光器和半导体激光器优势,具有体积小、光束质量好、效率高和输出功率大等优点,将MoS₂ SA作为调Q和锁模的非线性可饱和吸收器件是当前全固态激光领域的研究热点。有别于光纤激光器,全固态激光器对于腔型结构和元件要求高,谐振腔中的光束发散较为严重,导致光-光转换效率低,腔内器件损耗大。在谐振腔中实现非线性损耗的SA是锁模核心元件,SA的性能和参数会直接影响锁模稳定性和脉冲各项指标。就单层膜结构的MoS₂ SA而言,由于单层MoS₂具有较强的双光子吸收效应(TPA),因此在调Q和锁模实验中应用较为困难^[23];多层膜结构的MoS₂ SA易于制备,但对材料表面薄膜平整度、尺寸大小和层厚等要求严格。近几年,基于MoS₂ SA的超短脉冲固体激光器研究也取得一定进展。2015年,李平雪等^[24]用反射式MoS₂ SA实现Nd:YVO₄激光器的调Q和调Q锁模输出,获得1064.39 nm处调Q脉冲以及输出功率为95.3 mW的调Q锁模脉冲序列。2017年,Luan等^[25]基于MoS₂ SA以Tm, Ho:YAP作为增益介质实现了2 μm波段的调Q输出。本课题组^[26]利用MoS₂ SA作为光学调Q器件,在全固态激光器中获得了波长为532 nm的稳定调Q脉冲序列,重复频率为66.7 kHz、脉宽为320 ns。由于SA以及激光晶体上的光斑直径大,单位面积上的光功率密度小,很难达到全固态激光器所需的锁模阈值。目前,基于MoS₂ SA的全固态激光器研究多集中于调Q或调Q锁模输出,锁模脉冲输出报道较少。

本文主要研报道一种新型MoS₂ SA的制备、表征及其在全固态激光器中的应用。采用锂离子-插层法制备出高质量MoS₂ SA,其表面薄膜平整均匀、尺径大、层厚可控;设计了一种W型谐振腔,通过优化腔型结构和谐振腔参数,在MoS₂ SA上获得半径为31 μm的耦合光斑,提高了单位面积的功率密度,实现了基于MoS₂ SA的1063.9 nm皮秒锁模激光稳定输出。

2 二硫化钼可饱和吸收体的制备及表征

采用锂离子-插层法制备MoS₂纳米片溶液。
1) 将MoS₂粉末(XF NANO; CAS 1317-33-5, 101857,质量分数为99.8%)与丁基锂正己烷溶液在氩气环境中充分混合72 h,使锂离子充分插入MoS₂层间,形成插层化合物Li_xMoS₂,之后采用真

空过滤法收集 Li_xMoS_2 插层化合物,反复清洗,并在氩气保护的圆底烧瓶中干燥。2)将 Li_xMoS_2 粉末加入去离子水中,烧瓶中产生大量气体并形成黑色悬浮液。3)将悬浮液超声 3 h 并以 $1500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度离心,取离心后的上清液可成功获得少层 MoS_2 纳米片溶液。锂离子-插层法是目前最常用的,也是最有效的制备少层 MoS_2 纳米片溶液的方法,所制备的纳米片在水中具有高度的分散性,可长时间稳定在水中。同时,该方法制备出的 MoS_2 结晶度好、质量高、无杂质,且操作简单,尤其适合于制备催化材料、光电元器件等。4)在制得的 MoS_2 纳米片溶液中加入无水乙醇(体积分数为 99%)配比成一定浓度的混合溶液,通过超声、离心并悬挂至石英基底表面。5)将旋涂有 MoS_2 纳米片溶液的石英基底放置于干燥箱中制得 MoS_2 SA。

为检验制备得到的 MoS_2 SA 质量,采用吸收光谱法、拉曼光谱法、扫描电子显微镜(SEM)、原子力显微镜(AFM)等对制备的器件进行了表征。图 1

(a)为 MoS_2 纳米片溶液的吸收光谱测试图,600~700 nm 波段范围内出现的 A (613 nm) 和 B (659 nm) 两个特征位置,表明实验中用于制备 SA 的 MoS_2 纳米片溶液为稳定态的 2H 相^[27]。 MoS_2 的拉曼光谱中 E_{2g}^1 和 A_{1g} 两个特征峰分别对应了硫原子在水平和垂直平面方向上的振动,当薄膜层数发生变化时, E_{2g}^1 会出现红移,而 A_{1g} 会出现蓝移,两特征峰位的波数差与其厚度密切相关^[28]。如图 1 (b)所示, MoS_2 SA 拉曼光谱图中两个特征峰 E_{2g}^1 和 A_{1g} 分别位于 386.6 cm^{-1} 和 409.7 cm^{-1} 处,两峰之间波数差为 23.1 cm^{-1} ,可以看出 MoS_2 SA 表面薄膜为少层结构^[29]。SEM 结果显示 MoS_2 SA 表面薄膜尺寸较大,并呈现出片状二维结构,如图 1(c)所示。为更准确测量 MoS_2 SA 表面薄膜厚度,采用 AFM 对样品进行了表征,如图 1(d)所示。结果显示,该样品厚度为 $1.8\sim 3.5 \text{ nm}$ 。由于锂离子-插层法制备出的 MoS_2 单层厚度为 1 nm ^[30-31],从而可以算出本文方法制备的 MoS_2 薄膜为 2~3 层。

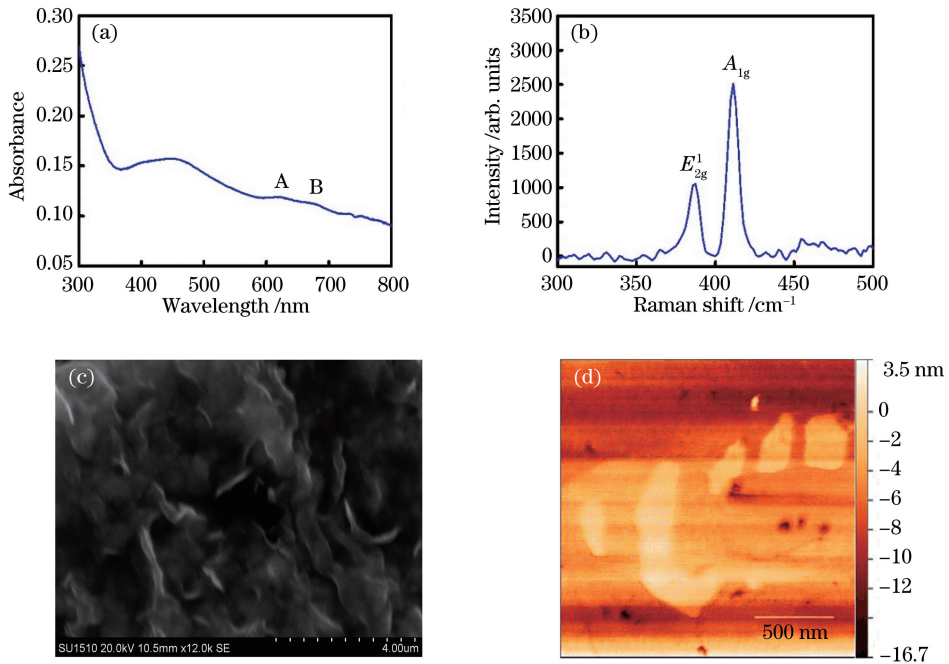


图 1 二硫化钼可饱和吸收体的表征。(a)吸收光谱;(b)拉曼光谱;(c)扫描电子显微镜图;(d)原子力显微镜图

Fig. 1 Characterization of the MoS_2 SA. (a) Absorption spectrum; (b) Raman spectrum; (c) SEM image; (d) AFM image

为了研究 MoS_2 SA 样品的透射率,采用分光光度计(Lambda 950, Perkin Elmer, 美国)测量了 MoS_2 SA 的传输特性。由图 2(a)所示的透射光谱图可知,在 1064 nm 处, MoS_2 SA 样品的透射率为 87.6% ,并产生了 12.4% 的线性损失。由于 SA 的调制深度会直接影响被动锁模固态激光器性能,

为此,还通过中心波长和脉宽分别为 1064 nm 和 4 ns 的 DAWA-S 型脉冲激光器测试了 MoS_2 SA 的非线性传输特性。 MoS_2 SA 的非线性透过率与输入脉冲强度关系如图 2 所示,根据实验测试数据可知其调制深度为 6% ,饱和光强为 $8.38 \text{ MW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

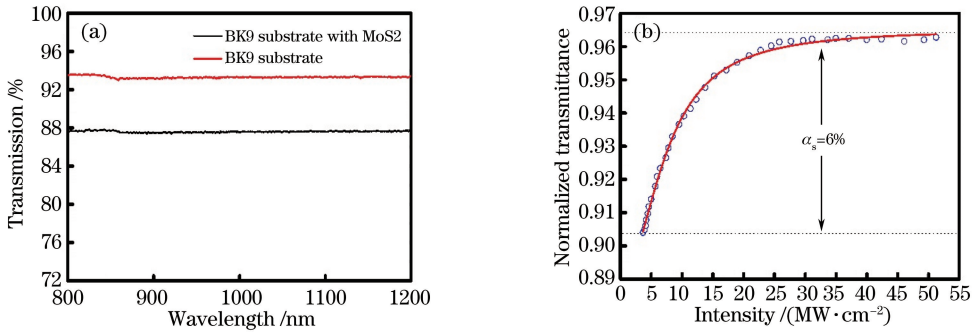


图 2 二硫化钼可饱和吸收特性。(a)二硫化钼可饱和吸收体透射光谱图;(b)二硫化钼可饱和吸收体非线性传输特性测量

Fig. 2 MoS₂ absorption characteristic. (a) Transmission spectrum of the MoS₂ SA;
(b) nonlinear transmission measurements of the MoS₂ SA

3 实验装置

为实现基于 MoS₂ SA 的全固态激光器锁模激光输出,设计了如图 3 所示的 W 型谐振腔,谐振腔由 Nd:YVO₄ 晶体、折叠镜 M₁、M₂、M₃ 以及输出镜 M₄ 组成,腔总长为 1.7 m。采用中心波长为 808 nm 的光纤耦合输出半导体激光器作为抽运源,最大输出功率为 20 W,光纤的芯径和数值孔径分别为 400 μm 和 0.22。抽运源输出的抽运光经过 1:1 耦合透镜组聚焦到激光晶体,光斑半径为 200 μm。Nd:YVO₄ 晶体为 a 轴切割, Nd³⁺ 的原子数分数为 0.5%, 晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 5 mm; 其左端面 S₁ 镀有 1064 nm 高反膜和 808 nm 增透膜, 右端面 S₂ 镀有 1064 nm 增透膜。Nd:YVO₄ 晶体使用铝箔包裹, 放置于紫铜夹具内并通水冷却, 冷却水温保持在 25 °C 左右, 以降低晶体热效应对实验结果的影响。距离 Nd:YVO₄

晶体 L₁ (L₁ = 245 mm) 处放置折叠镜 M₁, M₁ 为左端面镀有 1064 nm 高反膜的平面镜。折叠镜 M₂ 与 M₁ 的距离为 L₂ (L₂ = 355 mm), M₂ 为曲率半径 R₁ = 500 mm 且凹面镀有 1064 nm 高反膜的平凹镜。折叠镜 M₃ 与 M₂ 的距离为 L₃ (L₃ = 990 mm), M₃ 为曲率半径 R₂ = 206 mm 且凹面镀有 1064 nm 高反膜的平凹镜。输出镜 M₄ 与 M₃ 的距离为 L₄ (L₄ = 125 mm), M₄ 为右端面镀有 1064 nm 部分透射膜 (T = 5%) 的平面镜。由于锁模实验中激光增益介质和 MoS₂ SA 上的功率密度越高, 越利于达到锁模阈值^[32], 因此在确保激光增益介质和 MoS₂ SA 不被损坏的情况下, 采用了小透射率输出镜以提高腔内脉冲能量。同时, 为减小由于折叠所产生的像散, 谐振腔中折叠镜的偏折角小于 10°。根据 ABCD 矩阵理论^[33] 计算, Nd:YVO₄ 晶体和 MoS₂ SA 上振荡光的光斑半径分别为 209 μm 和 31 μm。

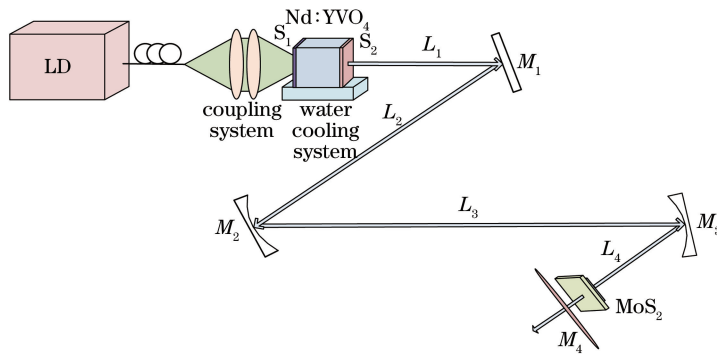


图 3 基于二硫化钼可饱和吸收体的锁模激光器实验装置图

Fig. 3 Experimental layout of the mode-locked laser based on MoS₂ SA

4 实验结果与讨论

采用上述实验装置, 分别研究了激光器在连续波和 MoS₂ SA 锁模运转情况下平均输出功率随吸

收抽运功率变化关系, 如图 4 所示。首先, 在连续波运转情况下, 激光器吸收抽运功率大于 0.57 W 时输出连续光, 当功率达到 8.58 W 时, 可获得 1.82 W 平均输出功率, 相应光-光转换效率和斜率效率分别为

21.2% 和 22.7%。然后,将 MoS₂ SA 紧贴输出镜 M₄ 插入谐振腔后,激光器在吸收抽运功率为 0.86~3.43 W 范围内处于调 Q 锁模(QML)阶段;当吸收抽运功率超过 3.43 W 时,开始出现明显的连续锁模(CWML)运转;随着吸收抽运功率逐渐增大,6.86 W 时得到锁模激光平均输出功率为 894 mW,相应的光-光转换效率和斜率效率分别为 13.03% 和 16.45%。此时,当抽运功率进一步增加时,激光器的脉冲工作模式由 CWML 过渡为 QML,其主要原

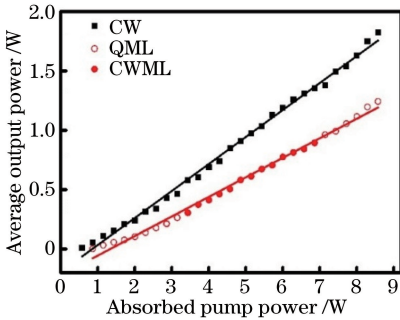


图 4 平均输出功率与吸收抽运功率关系曲线
Fig. 4 Relationship curve between average output power and absorbed pump power

因可能是由于 MoS₂ SA 的热不稳定和过饱和所引起^[34-35]。实验中,Nd:YVO₄ 晶体的热透镜效应会随吸收抽运功率的增加而越来越明显,为防止 Nd:YVO₄ 晶体和 MoS₂ SA 损坏,吸收抽运功率增大至 8.58 W 后便停止增加。

为观察激光器输出的脉冲序列,采用快速光电二极管(818-BB-21, Newport, 美国)接收实验装置中产生的激光脉冲,采用数字示波器(MSO7052B, Agilent, 美国)记录各阶段波形。图 5 为当吸收抽运功率达到 4 W 时典型锁模脉冲序列。由图 5 可知,脉冲序列间隔分布均匀,振幅具有良好稳定性,每个振荡模式均保持固定的相位关系。该锁模脉冲序列重复频率为 87 MHz,与腔长对应的理论重复频率($F=c/2L$, 式中 c 为光速, L 为整个谐振腔的长度)基本一致。实验中,激光器处于稳定的连续锁模状态的时间超过 1 h。为验证激光器锁模脉冲的稳定性,通过频谱分析仪(N9918A, Agilent, 美国)测量了 87.2 MHz 处输出脉冲激光射频谱,如图 6 所示。由图可知,脉冲信噪比为 45.1 dB,表明锁模激光输出较为稳定。

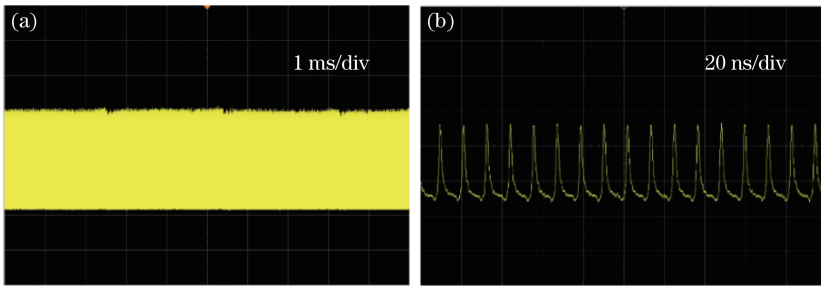


图 5 吸收抽运功率为 4 W 时(a) 1 ms/div 和(b) 20 ns/div 锁模脉冲序列
Fig. 5 Pulse sequence of the mode-locked at (a) 1 ms/div time scale and (b) 20 ns/div time scale under the absorbed pump power of 4 W

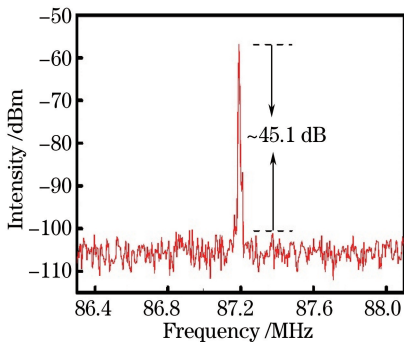


图 6 锁模脉冲激光频谱图
Fig. 6 Spectrum of the mode-locked laser

图 7(a)为吸收抽运功率为 4 W 时,连续波和锁模运转情况下的输出激光光谱。激光器的连续波输

出光谱半峰全宽为 1.05 nm,中心波长为 1063.4 nm;基于 MoS₂ SA 的锁模输出光谱半峰全宽为 1.89 nm,中心波长为 1063.9 nm。将输出的锁模激光接入自相关仪(FR-103HP, Femtochrome Research Inc, 美国)测量脉冲持续时间。图 7(b)为锁模脉冲自相关曲线,图中横坐标和纵坐标分别为时间和归一化脉冲强度,虚线为实际测得数据,实线为拟合曲线。当设定脉冲强度分布为高斯型时,从自相关曲线波形中可以得到锁模脉冲的半峰全宽为 5 ps,计算得到时间带宽积为 2.5,高于高斯脉冲模型下的极限值 0.441。因此,若使用压缩脉宽的色散补偿装置,进一步优化谐振腔参数以及提高 SA 的制备质量,将会得到更窄的脉冲宽度。2016 年,

Feng 等^[36]将 MoS₂ SA 作为锁模器件,实现了全固态激光器在 1064 nm 处的锁模激光输出,输出脉宽

12.7 ps,脉冲信噪比为 29 dB。与其相比,本文所得锁模脉冲激光输出更窄、锁模激光输出更加稳定。

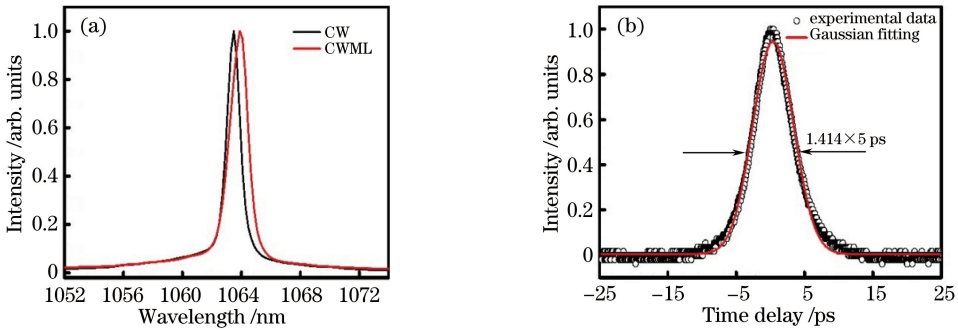


图 7 激光器输出光谱图和自相关曲线图。(a)吸收抽运功率 4 W 时连续波和锁模运转情况下输出光谱;
(b)锁模脉冲自相关曲线

Fig. 7 Laser output spectrogram and autocorrelation curve. (a) Output laser spectra of CW and mode-locked operation under the absorbed pump power of 4 W; (b) autocorrelation signal of the mode-locked pulse

5 结 论

利用锂离子-插层法成功制备了 MoS₂ 纳米片溶液,通过超声、离心、悬涂、干燥等步骤获得了性能优良的 MoS₂ SA。采用 Nd:YVO₄ 晶体作为激光增益介质,设计了一种 W 型谐振腔全固态激光器,实现了基于 MoS₂ SA 的 1063.9 nm 皮秒锁模激光稳定输出。当吸收抽运功率达到 6.86 W 时,得到锁模激光平均输出功率为 894 mW,单脉冲能量为 10.28 nJ,峰值功率为 2.056 kW,光-光转换效率为 13.03%;锁模脉冲光谱宽度为 1.89 nm,锁模脉冲宽度为 5 ps,重复频率为 87 MHz,频谱信号信噪比为 45.1 dB。结果表明,MoS₂ 作为非线性饱和吸收材料具有恢复时间极短、损耗低、制备简单和成本低廉等优点,有望成为新一代光电器件的核心材料。

参 考 文 献

[1] Zhang B Y, Li G, Chen M, *et al.* Comparative study of the mode-locking of Nd:GdVO₄ and Nd:YAG lasers with semiconductor saturable absorber mirrors [J]. Chinese Optics Letters, 2003, 1(8): 477-479.
 [2] Chen M, Zhang B Y, Li G, *et al.* Study on SESAM passively-mode-locked Nd:YAG laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(6): 646-648.
 陈檬, 张丙元, 李港, 等. 半导体可饱和吸收镜被动锁模 Nd:YAG 激光器的研究 [J]. 中国激光, 2004, 31(6): 646-648.
 [3] Wang J, Zhang H M, Zhang J, *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, 张鋈, 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.

[4] Li X, Wang Y G, Zhang S Q, *et al.* Passively mode-locked side-pumped Nd:YAG laser with SESAM [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3103-3107.
 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): 3103-3107.
 [5] Liu P Z, Hou J, Zhang B, *et al.* 1550 nm passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(7): 98-100.
 刘鹏祖, 侯静, 张斌, 等. 基于半导体可饱和吸收镜的 1550 nm 被动锁模光纤激光器 [J]. 中国激光, 2011, 38(7): 98-100.
 [6] Liu P Z, Hou J, Zhang B, *et al.* Passively mode-locked fiber ring laser using semiconductor saturable absorber mirror [J]. Laser Physics, 2011, 22(1): 273-277.
 [7] Mouchel P, Semaan G, Niang A, *et al.* High power passively mode-locked fiber laser based on graphene nanocoated optical taper [J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(3): 031106.
 [8] Song Q, Zhang B Y, Wang G J, *et al.* Tungsten disulfide-graphene oxide as saturable absorber for passively Q-switched mode-locked Nd:GdTaO₄ laser at 1066 nm [J]. Optics Communications, 2017, 406: 76-79.
 [9] Ahmad H, Aidit S N, Ooi S I, *et al.* Passively Q-switched and mode-locked erbium doped fiber laser based on N-doped graphene saturable absorber [J]. Laser Physics, 2017, 27(10): 105302.
 [10] Chen H R, Tsai C Y, Cheng H M, *et al.* High-

- power passively continuous-wave and Q-switching mode-locked Nd:LuVO₄ laser by few-layer graphene-oxide films[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(12): 3927-3939.
- [11] Bi W H, Ma J Y, Yang K L, *et al.* Graphene-based optical fiber and its applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(4): 040002.
毕卫红, 马敬云, 杨凯丽, 等. 石墨烯光纤及其应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(4): 040002.
- [12] Wang J, Zhang X Y, Zhang S F, *et al.* Research progress of two-dimensional nonlinear optical materials and devices[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0703004.
王俊, 张晓艳, 张赛锋, 等. 二维非线性光学材料与器件研究进展 [J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0703004.
- [13] Ling W J, Xia T, Dong Z, *et al.* WS₂ saturable absorber for passively Q-switched Tm, Ho:LLF lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0703020.
令维军, 夏涛, 董忠, 等. 基于 WS₂ 可饱和吸收体的被动调 Q Tm, Ho:LLF 激光器 [J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0703020.
- [14] Huang M J, Zhou Y X, Guo Y H, *et al.* Facile one-pot liquid exfoliation preparation of molybdenum sulfide and graphene heterojunction for photoelectrochemical performance [J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53(10): 7744-7754.
- [15] Cui X H, Chen H Y, Yang T. Research progress on the preparation and application of nano-sized molybdenum disulfide [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2016, 74(5): 392-400.
崔向红, 陈怀银, 杨涛. 纳米尺寸二硫化钼的制备与应用研究进展 [J]. *化学学报*, 2016, 74(5): 392-400.
- [16] Nady A, Ahmed M H M, Latiff A A, *et al.* Nickel oxide nanoparticles as a saturable absorber for an all-fiber passively Q-switched erbium-doped fiber laser [J]. *Laser Physics*, 2017, 27(6): 065105.
- [17] Gao L, Zhu T, Huang W, *et al.* Stable, ultrafast pulse mode-locked by topological insulator nanosheets interacting with photonic crystal fiber: from anomalous dispersion to normal dispersion[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1): 1-8.
- [18] Zhang H, Lu S B, Zheng J, *et al.* Molybdenum disulfide (MoS₂) as a broadband saturable absorber for ultra-fast photonics [J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 7249-7260.
- [19] Luo Z Q, Huang Y Z, Zhong M, *et al.* 1-, 1.5-, and 2- μ m fiber lasers Q-switched by a broadband few-layer MoS₂ Saturable absorber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(24): 4077-4084.
- [20] Khazaiezhad R, Kassani S H, Nazari T, *et al.* Saturable optical absorption in MoS₂ nano-sheet optically deposited on the optical fiber facet [J]. *Optics Communications*, 2015, 335(15): 224-230.
- [21] Duan L N, Su Y L, Wang Y G, *et al.* Passively mode-locked erbium-doped fiber laser via a D-shape-fiber-based MoS₂ saturable absorber with a very low nonsaturable loss [J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(2): 024206.
- [22] Wang X F, Zhang J H, Gao Z Y, *et al.* Nanosecond mode-locked Tm-doped fiber laser based on graphene saturable absorber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(11): 114205.
- [23] Li Y X, Dong N N, Zhang S F, *et al.* Giant two-photon absorption in monolayer MoS₂ [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(4): 427-434.
- [24] Li P X, Zhang G J, Zhang H, *et al.* Q-switched and Q-switched mode-locking operation from Nd:YVO₄ laser using reflective MoS₂ saturable absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s1): s114003.
李平雪, 张光举, 张晗, 等. 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 [J]. *光学学报*, 2015, 35(s1): s114003.
- [25] Luan C, Zhang X Y, Yang K J, *et al.* High-peak power passively Q-switched 2- μ m laser with MoS₂ saturable absorber [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(1): 1-5.
- [26] Chang J H, Yang Z B, Li H H, *et al.* Passively Q-switched Nd:YVO₄/PPLN green laser with a few-layered MoS₂ saturable absorber[J]. *Optical Review*, 2017, 24: 765-771.
- [27] Zhang X Y, Zhang S F, Chang C X, *et al.* Facile fabrication of wafer-scale MoS₂ neat films with enhanced third-order nonlinear optical performance [J]. *Nanoscale*, 2015, 7(7): 2978-2986.
- [28] Lee C, Yan H G, Brus L E, *et al.* Anomalous lattice vibrations of single- and few-layer MoS₂ [J]. *ACS Nano*, 2010, 4(5): 2695-2700.
- [29] Ghatak S, Pal A N, Ghosh A. Nature of electronic states in atomically thin MoS₂ field-effect transistors [J]. *ACS Nano*, 2011, 5(10): 7707-7712.
- [30] Radisavljevic B, Radenovic A, Brivio J, *et al.* Single-layer MoS₂ transistors [J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(3): 147-150.
- [31] Zeng Z Y, Yin Z Y, Huang X, *et al.* Single-layer semiconducting nanosheets: high-yield preparation and device fabrication [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2011, 50(47): 11093-11097.
- [32] Hönninger C, Paschotta R, Morier-Genoud F, *et al.* Q-switching stability limits of continuous-wave

- passive mode locking [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1999, 16(1): 46-56.
- [33] Zhang X, Sun M. Matrix calculation of equivalent cavity and speckle of folded resonator[J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 1980 (3): 36-44.
- 张新昌, 孙孟嘉. 折迭谐振腔的等效腔及镜面光斑的矩阵计算[J]. 山西大学学报(自然科学版), 1980 (3): 34-42.
- [34] Hou J, Zhao G, Wu Y Z, *et al.* Femtosecond solid-state laser based on tungsten disulfide saturable absorber[J]. Optics Express, 2015, 23(21): 27292-27298.
- [35] Qin Z P, Xie G Q, Zhao C J, *et al.* Mid-infrared mode-locked pulse generation with multilayer black phosphorus as saturable absorber[J]. Optics Letters, 2016, 41(1): 56-59.
- [36] Feng C, Zhang X Y, Wang J, *et al.* Passively mode-locked $\text{Nd}^{3+} : \text{YVO}_4$ laser using a molybdenum disulfide as saturable absorber[J]. Optical Materials Express, 2016, 6(4): 1358-1366.