

文章编号: 1000-7032(2021)05-0668-06

基于超薄层 MoS₂可饱和吸收体的 被动调 Q 固体 Nd:YAG 激光器

付鑫鹏^{1,2}, 付喜宏^{1,2*}, 姚 聪^{1,2}, 杨 飞³,
张 俊^{1,2}, 彭航宇^{1,2}, 秦 莉^{1,2}, 宁永强^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 利用超声剥离法制备了超薄层 MoS₂ 纳米片分散液可饱和吸收体, 以石英池为容器插入 Nd:YAG 激光器的平凹谐振腔中, 调节谐振腔镜的位置并增大泵浦功率, 成功实现了 Nd:YAG 激光器被动调 Q 脉冲输出。实验结果显示, 泵浦功率为 2.46 W 时, 激光器开始调 Q 运转。泵浦功率为 14.55 W 时, 实现了 485 mW 的脉冲激光输出功率, 重复频率为 189.75 kHz, 脉冲宽度为 1.2 μs, 对应的最大脉冲能量为 2.56 μJ。结果表明, 超薄层 MoS₂ 分散液是适用于 1 064 nm 波长固体激光器被动调 Q 运转的可饱和吸收体材料。

关 键 词: 超薄层 MoS₂ 纳米片分散液; 可饱和吸收体; Nd:YAG 激光器; 被动调 Q 脉冲

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20210030

Passive Q-switched Solid-state Nd:YAG Laser Based on Ultrathin MoS₂ Saturable Absorber

FU Xin-peng^{1,2}, FU Xi-hong^{1,2*}, YAO Cong^{1,2}, YANG Fei³, ZHANG Jun^{1,2},
PENG Hang-yu^{1,2}, QIN Li^{1,2}, NING Yong-qiang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics,

Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding Author, E-mail: fuxh@ciomp.ac.cn

Abstract: The ultrathin MoS₂ nanosheet dispersion saturable absorber is prepared by ultrasonic peeling method. The quartz cell is used as a container and insert into the flat-concave cavity of the Nd:YAG laser. By adjusting the position of the resonant cavity mirror and increasing the pump power, the passive Q-switched pulse output of the Nd:YAG laser is successfully achieved. Experimental results show that when the pump power is 2.46 W, the laser starts Q-switched operation. When the pump power is 14.55 W, the maximum pulse laser output power of 485 mW is achieved, the repetition frequency is 189.75 kHz, the pulse width is 1.2 μs, and the corresponding maximum pulse

收稿日期: 2021-01-17; 修订日期: 2021-01-31

基金项目: 科技部重点研发计划(2018YFB1107600); 吉林省科技发展计划(20200401060GX 20190302042GX); 发光学及应用国家重点实验室自主创新课题(SKL1-Z-2020-02); 吉林省与中国科学院科技合作高技术产业化专项资金项目(2019SYHZ0017); 广东省重点研发计划(2020B090922003); 国家自然科学基金(61535013)资助项目

Supported by Key R&D Program Project of Ministry of Science and Technology(2018YFB1107600); Science and Technology Development Program Project of Jilin Province(20200401060GX 20190302042GX); Independent Innovation Project of The State Key Laboratory of Luminescence and Applications(SKL1-Z-2020-02); Science and Technology Cooperation Project between Jilin Province and The Chinese Academy of Sciences(2019SYHZ0017); Guangdong Province Key Research and Development Program(2020B090922003); National Natural Science Foundation of China(61535013)

energy is 2.56 μJ . The results show that the ultrathin MoS₂ aqueous solution is a saturable absorber material suitable for passive Q-switching operation of 1 064 nm wavelength solid-state lasers.

Key words: ultrathin MoS₂ nanosheet dispersion; saturable absorber; Nd:YAG laser; passive Q-switched pulse

1 引言

超快激光具有独特的超短脉冲,能在较低的平均功率下获得超高的峰值功率,在现代科学的各个领域发挥了重要的作用。例如,利用其超高峰值功率特性实现的激光加工、激光医学手术和激光约束核聚变等技术,利用其超短时间分辨特性实现的微观粒子动力学行为探测、超快化学反应探测、大容量高精度的光通讯系统等技术,以及利用其丰富的光谱成分实现的脉冲整形、光谱检测技术等等。超短脉冲激光以其强大的功用谱写了一部典型的学科交叉的创造发明史,其发展充满着挑战、机遇和创新空间。

被动调 Q 和锁模技术是获得脉冲激光的常用方法。目前应用于被动调 Q 和锁模的可饱和吸收体主要有半导体可饱和吸收镜 (SESAM)^[1-3]、碳纳米管^[4-8]、石墨烯^[9-10] 以及新型二维材料^[11-15]。SESAM 工作稳定,损耗小,已实现商业化生产,并在固体激光器及光纤激光器中广泛使用。但是,SESAM 的恢复时间和调制深度不易控制,工作带宽较窄且只在近红外波段有成熟的产品,不能满足宽波段调谐的要求,从而限制了它的应用。2003 年,Set 等首次以碳纳米管作为可饱和吸收体应用于掺铒光纤激光器中实现锁模运转^[4]。此后,碳纳米管作为另一种常用的可饱和吸收体被应用于光纤激光器^[5] 与固体激光器^[6-8] 中实现被动调 Q、锁模脉冲输出。碳纳米管具有响应时间短(<800 fs)、偏振不敏感等优点,其吸收波长取决于管壁直径,虽然通过不同直径碳纳米管的混合可以实现宽波段吸收的目标,却会导致较大的散射损耗。2009 年,石墨烯凭借狄拉克锥能带结构在强光下的泡利阻塞效应实现的宽波段吸收特性,作为新型可饱和吸收体被成功地应用于光纤激光器中实现锁模脉冲输出^[9]。随后,类石墨烯结构的黑磷^[13-14] 和过渡金属硫族化合物^[11-12,15] 等二维材料可饱和吸收体被相继报道,因其成本低、恢复时间短和饱和光强低等优势,被广泛地应用于激光器被动调 Q、锁模中,促进了脉

冲激光的发展。

作为过渡金属硫族化合物家族中具有代表性的一员,MoS₂ 具有 S-Mo-S 的三明治结构,层内以共价键结合,层间以范德华力结合,层间作用力可以有效影响物质的能带结构。MoS₂ 体材料为间接带隙能带结构,带隙宽度为 1.2 eV^[16]。单层 MoS₂ 为直接带隙能带结构,带隙宽度为 1.8 eV^[17]。超薄层 MoS₂ 包括单层及少数层级材料,带隙宽度在 1.7 ~ 1.8 eV 之间^[16]。然而,上述 MoS₂ 电学性能是建立在原子晶格高度完整基础上的。在实际加工过程中,不可避免地会引入杂质或缺陷,晶格结构发生偏离,通过电子局域化效应,使 MoS₂ 能带结构发生改变,带隙宽度变窄。山东大学 Wang 等证明了引入 S 原子缺陷至 S/Mo 比分别为 1.94 与 1.89 时,带隙宽度减小为 1.08 eV 与 0.26 eV^[17-18]。引入 Mo 原子缺陷至 S/Mo 比为 2.17 时,带隙宽度减小为 0.13 eV,用其制造的光电探测器的工作带宽可达 445 nm ~ 9 μm ^[19]。带隙窄化的 MoS₂ 在强光激发下发生泡利阻塞效应,在可见光波段与近红外波段均能表现出良好的非线性光学特性。2013 年,Wang 等采用开孔 Z 扫描的方法,测量了其三阶非线性吸收系数可达 10^{-15} esu 量级^[20]。2015 年,Zhang 等采用 MoS₂ 可饱和吸收器件实现了 1 535 ~ 1 565 nm 的连续可调谐脉冲激光输出^[21]。2019 年,令维军等利用反射式 MoS₂ 可饱和吸收体实现了 2 μm 波段的 Tm:LuAG 激光器被动调 Q 锁模脉冲输出^[22]。相较于体材料 MoS₂,超薄层 MoS₂ 纳米片更能均匀分散在水溶液中,不需加任何其他有机溶剂,而且其具有低光限幅阈值、大非线性折射率以及高品质因数^[23],更适合作为可饱和吸收体用于激光器调 Q 锁模过程中。

本文利用超薄层 MoS₂ 纳米片作为可饱和吸收材料,采用石英池盛放分散液的方式提升材料的抗损伤阈值,在激光介质 Nd:YAG 中实现了调 Q 脉冲输出。脉冲激光中心波长为 1 064.29 nm,最大输出功率为 485 mW,对应的单脉冲能量为 2.5 μJ ,锁模脉冲序列的重复频率为 189.7 kHz。

2 实 验

2.1 超薄层 MoS₂ 可饱和吸收体的制备与表征

把 500 mg 的 MoS₂ 粉末倒进 100 mL 水中,搅拌均匀。高功率超声 2 h 后,MoS₂ 粉末在水中充分分散开,部分材料被剥离成超薄层的 MoS₂ 纳米片。之后对获得的分散液进行离心 8 000 r/min 下 5 min,使未剥离的大块 MoS₂ 材料沉淀底部。静置 24 h 后,取上清液,获得 0.3 mg/mL 的超薄层 MoS₂ 纳米片分散液。使用移液枪将其转移到 45 mm × 12 mm × 1 mm 的高透率石英池中,用密封胶封住石英池开口,保持溶液浓度不变。

图 1(a) 为石英池内盛放的超薄层 MoS₂ 片分散液的照片;因受到薄层的张力效应和微重力效应,可能会导致其在石英池边缘与上下的浓度有所不同,但是针对几百微米直径的激光光束应用,可认为其保持了较好的均匀性。图 1(b) 为可饱和吸

收材料的扫描电子显微镜图像,呈现明显的超薄层片状结构。将制备的超薄层 MoS₂ 分散液滴定在石英片上,静置待溶液蒸发完后,测量其拉曼光谱。如图 1(c) 所示,面内振动模式 E_{2g}¹ 和面外振动模式 A_{1g} 分别位于 383.3 cm⁻¹ 与 407.3 cm⁻¹ 处,频率间隔为 24 cm⁻¹,与前人报道的少层 MoS₂ 的拉曼峰间隔保持一致^[24-25],明显小于体材料 MoS₂ 的 E_{2g}¹ 与 A_{1g} 拉曼峰间隔 25 ~ 26 cm⁻¹。拉曼光谱结果进一步确定了实验所用可饱和吸收体为高质量的超薄层 MoS₂ 纳米片材料。图 1(d) 为采用平衡双探测装置测量的超薄层 MoS₂ 纳米片分散液可饱和吸收体在不同脉冲激光强度下的透过率曲线。平衡双探测装置的光源为 1 064 nm 波长的声光调 Q 激光器,脉冲宽度为 96 ns,重复频率为 10 kHz。透过率曲线可以用可饱和吸收模型进行拟合:

$$T(I) = 1 - \Delta T \exp\left(-\frac{I}{I_{\text{sat}}}\right) - T_{\text{ns}}, \quad (1)$$

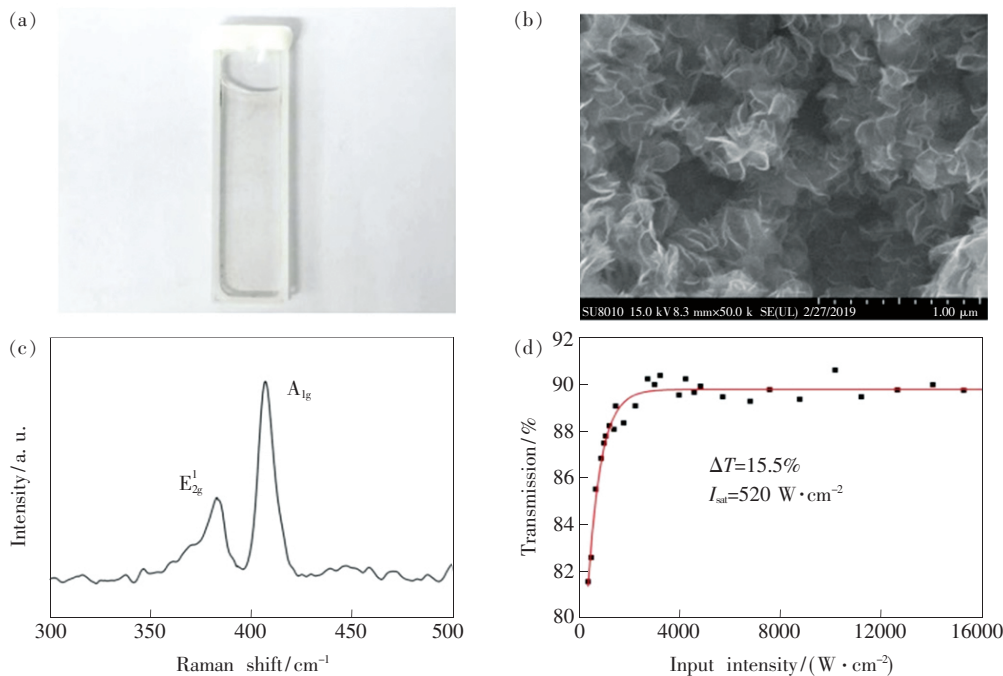


图 1 (a) 石英池内超薄层 MoS₂ 纳米片分散液的照片; (b) 超薄层 MoS₂ 纳米片的扫描电子显微镜图片; (c) 拉曼光谱; (d) 饱和吸收透过率曲线。

Fig. 1 (a) Ultrathin MoS₂ nanosheet dispersion solution in quartz cell. (b) SEM image of the ultrathin MoS₂ nanosheets. (c) Raman spectrum of the ultrathin MoS₂ nanosheets. (d) Nonlinear transmittance curve of the MoS₂ SA.

其中 T 为透过率, I 为入射光强, ΔT 代表调制深度, T_{ns} 代表非饱和损耗, I_{sat} 代表饱和吸收强度。通过对透过率曲线拟合,求得超薄层 MoS₂ 纳米片分散液可饱和吸收体的调制深度为 15.5%,饱和吸收强度为 520 W/cm²。非饱和损耗为 10.2%,

其主要来源于石英池的菲涅耳损耗与可饱和吸收体的散射损耗。相较于前人对 MoS₂ 可饱和吸收特性的报道结果^[26-27],我们的超薄层 MoS₂ 纳米片分散液可饱和吸收体具有更高的调制深度、更低的饱和吸收强度与非饱和损耗,其内在物理机

制为超薄层 MoS₂ 相对于同等质量的体材料 MoS₂ 具有更高的吸收系数与光生载流子密度,使其具有更高的调制深度与更低的饱和吸收强度。同时,超薄层 MoS₂ 尺寸的均匀性可以有效地减小体材料 MoS₂ 由于尺寸大小不一带来的散射损耗,并且在后续的工作中,可通过对石英池两侧镀膜降低菲涅耳损耗的方式,实现更低的非饱和损耗。

2.2 实验装置

图2所示为实验所用的固体 Nd:YAG 被动调 Q 激光器装置示意图,选用光纤耦合 808 nm 波长的半导体激光器作泵浦源,光纤的数值孔径为 0.22,芯径为 400 μm,泵浦光经 1:1 准直聚焦系统会聚于增益晶体上。选用平凹谐振腔,腔长 85 mm,其主要包括输入镜 IM、Nd:YAG 增益晶体、输出镜 OC 与可饱和吸收体几部分。其中输入镜 IM 为凹面镜,曲率半径为 500 mm,表面镀有 1 064 nm 高反、808 nm 增透膜。增益晶体选用直径为 3 mm、长度为 10 mm 的 Nd:YAG 晶体棒,晶体端面被铜箔包裹后放置在铜块中,之后用半导体制冷器使铜块与晶体的温度保持在 20 °C。输出镜 OC 选用 1 064 nm 波长处 10% 透过率的平面镜。

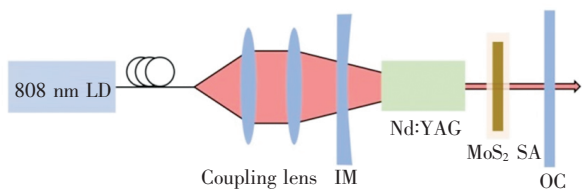


图2 基于超薄层 MoS₂ 可饱和吸收体的被动调 Q 固体 Nd:YAG 激光器示意图

Fig.2 Schematic of passively Q-switched Nd:YAG laser with ultrathin MoS₂ SA

3 结果与讨论

采用上述实验装置,调整腔镜及晶体的位置,实现连续激光输出。然后,以石英池为容器将超薄层 MoS₂ 分散液可饱和吸收体插入谐振腔中,调节可饱和吸收体位置,逐步增加泵浦光功率,即可实现调 Q 脉冲输出。图3(a)给出了脉冲激光的平均输出功率随泵浦功率的演化趋势。当泵浦功率为 2.46 W 时,开始出现调 Q 运转,相应的输出功率为 7.8 mW;当泵浦功率为 14.55 W 时,得到该实验中最大的调 Q 脉冲输出功率 485 mW,

整体演化过程的斜效率为 3.95%。

调 Q 脉冲激光的重复频率和脉冲宽度随泵浦功率的演化趋势如图3(b)所示,从图中可知,随着泵浦功率从 2.46 W 增加到 14.55 W,激光的重复频率从 66.67 kHz 升高到 189.75 kHz,相应的脉冲宽度从 1.41 μs 变窄至 1.2 μs。产生该现象的内在机制为泵浦功率的增加能够加快激光上能级反转粒子数的积累和消耗,从而导致脉冲重复频率增大。同时,激光晶体的初始反转粒子数增加可以有效地减少脉冲的上升时间,使得脉冲宽度减小。

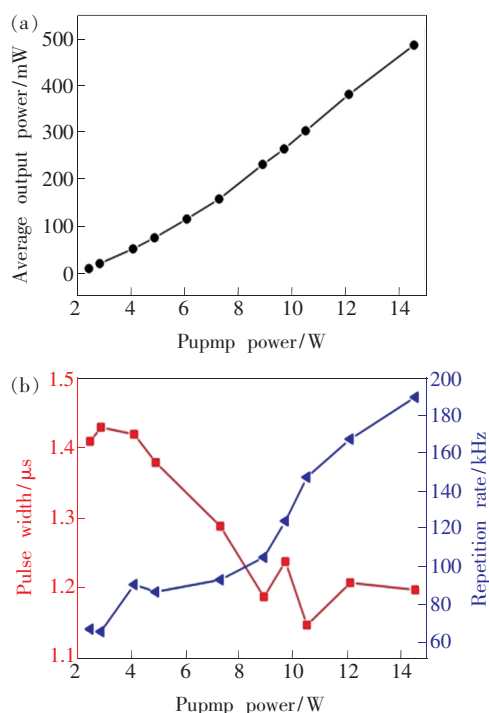


图3 被动调 Q 激光的平均输出功率(a)、脉冲宽度和重复频率(b)随泵浦功率的变化。

Fig.3 Average output power(a), pulse width and pulse repetition(b) of the Q-switched laser versus pump power.

为观察脉冲激光器的输出波形,实验中结合高速光电探测器(Thorlabs DET01CFC)与数字示波器(Tektronix MSO4104B),实现激光脉冲的接收,并记录实时波形。根据平均输出功率和重复频率,能够计算得出 Nd:YAG 被动调 Q 激光的单脉冲能量随泵浦功率的增加而变大。图4为泵浦功率 14.55 W 时脉冲激光的脉冲序列和单脉冲波形,其中脉冲序列相位关系固定,间隔分布均匀。根据 485 mW 平均输出功率与 189.75 kHz 的重

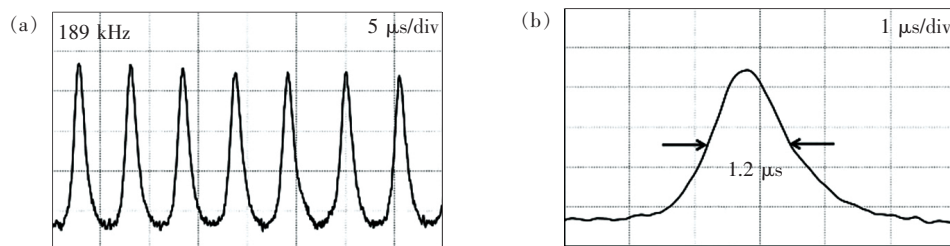
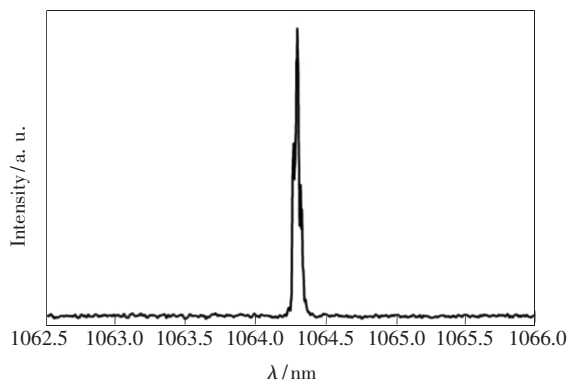
图 4 调 Q 脉冲激光的脉冲序列和单脉冲波形Fig. 4 Pulse sequence and single pulse waveform of Q -switched laser

图 5 输出激光光谱

Fig. 5 Output lasing spectrum

复频率, 计算得出该实验中被调 Q 激光的最大单脉冲能量 $2.56 \mu\text{J}$ 。选用 YOKOGAWA AQ63700 型号的光谱仪测量被动调 Q 脉冲激光的波长。图 5 所示为 Nd: YAG 脉冲激光的光谱图 被动调 Q 脉冲

激光中心波长为 1064.29 nm , 且其不随泵浦功率变化而改变。

4 结 论

利用超声剥离法制备了超薄层 MoS_2 分散液可饱和吸收体, 并以石英池为容器插入到 Nd: YAG 激光谐振腔中实现了 1064.29 nm 波长的被动调 Q 脉冲输出。当泵浦功率为 2.46 W 时, 激光器进入调 Q 运转状态, 随着泵浦功率的增大, 谐振腔内功率密度得以提升, 脉冲重复频率逐渐增大, 脉冲宽度逐渐变窄。直至泵浦功率达到 14.55 W 时, 实现最大的平均输出功率 485 mW , 脉冲宽度为 $1.2 \mu\text{s}$, 最大的重复频率 189.75 kHz , 最大的单脉冲能量 $2.56 \mu\text{J}$ 。该实验表明, 超薄层 MoS_2 分散液可以作为中心波长 1064 nm 固体激光器有效的可饱和吸收体材料, 实现被动调 Q 功能。

参 考 文 献:

- [1] ZIRNGIBL M, STULZ L W, STONE J *et al.*. 1.2 ps pulses from passively mode-locked laser diode pumped Er-doped fibre ring laser [J]. *Electron. Lett.*, 1991, 27(19): 1734-1735.
- [2] LOH W H, ATKINSON D, MORKEL P R *et al.*. Passively mode-locked Er^{3+} fiber laser using a semiconductor nonlinear mirror [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, 5(1): 35-37.
- [3] LOH W H, ATKINSON D, MORKEL P R *et al.*. All-solid-state subpicosecond passively mode locked erbium-doped fiber laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, 63(4): 4-6.
- [4] SET S Y, YAGUCHI H, TANAKA Y *et al.*. Laser mode locking using a saturable absorber incorporating carbon nanotubes [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, 22(1): 51-56.
- [5] WANG F, ROZHIN A G, SCARDACI V *et al.*. Wideband-tuneable nanotube mode-locked fibre laser [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2008, 3(12): 738-742.
- [6] SCHIBLI T R, MINOSHIMA K, KATAURA H *et al.*. Ultrashort pulse-generation by saturable absorber mirrors based on polymer-embedded carbon nanotubes [J]. *Opt. Express*, 2005, 13(20): 8025-8031.
- [7] SCHMIDT A, RIVIER S, STEINMEYER G *et al.*. Passive mode locking of Yb: KLuW using a single-walled carbon nanotube saturable absorber [J]. *Opt. Lett.*, 2008, 33(7): 729-731.
- [8] CHO W B, YIM J H, CHOI S Y *et al.*. Boosting the non linear optical response of carbon nanotube saturable absorbers for broadband mode-locking of bulk lasers [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2010, 20(12): 1937-1943.

- [9] BAO Q L, ZHANG H, WANG Y *et al.*. Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2009, 19(19): 3077-3083.
- [10] ZHANG H, BAO Q L, TANG D Y *et al.*. Large energy soliton erbium-doped fiber laser with a graphene-polymer composite mode locker [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(14): 141103-1-3.
- [11] ZHANG S F, DONG N N, MCEVOY N *et al.*. Direct observation of degenerate two-photon absorption and its saturation in WS₂ and MoS₂ monolayer and few-layer films [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(7): 7142-7150.
- [12] 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.
- [13] CHEN Y, JIANG G B, CHEN S Q *et al.*. Mechanically exfoliated black phosphorus as a new saturable absorber for both Q-switching and mode-locking laser operation [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(10): 12823-12833.
- [14] WANG Y, YANG B C, WAN B S *et al.*. Degradation of black phosphorus: a real-time ³¹P NMR study [J]. *2D Mater.*, 2016, 3(3): 035025-1-6.
- [15] HE J S, TAO L L, ZHANG H *et al.*. Emerging 2D materials beyond graphene for ultrashort pulse generation in fiber lasers [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(6): 2577-2593.
- [16] WANG Q H, KALANTAR-ZADEH K, KIS A *et al.*. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2012, 7(11): 699-712.
- [17] WANG S X, YU H H, ZHANG H J *et al.*. Broadband few-layer MoS₂ saturable absorbers [J]. *Adv. Mater.*, 2014, 26(21): 3538-3544.
- [18] XIE Y, ZHANG B, WANG S X *et al.*. Ultrabroadband MoS₂ photodetector with spectral response from 445 to 2 717 nm [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(17): 1605972.
- [19] XIE Y, LIANG F, WANG D *et al.*. Room-temperature ultrabroadband photodetection with MoS₂ by electronic-structure engineering strategy [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(50): e1804858-1-6.
- [20] WANG K P, WANG J, FAN J T *et al.*. Ultrafast saturable absorption of two-dimensional MoS₂ nanosheets [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(10): 9260-9267.
- [21] ZHANG M, HOWE R C T, WOODWARD R I *et al.*. Solution processed MoS₂-PVA composite for sub-bandgap mode-locking of a wideband tunable ultrafast Er: fiber laser [J]. *Nano Res.*, 2015, 8(5): 1522-1534.
- [22] 令维军, 孙锐, 陈晨, 等. 基于反射式 MoS₂ 可饱和吸收体调 Q 锁模 Tm: LuAG 激光器 [J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 0808002-1-6.
- LING W J, SUN R, CHEN C *et al.*. Passively Q-switched mode-locked Tm: LuAG laser with reflective MoS₂ saturable absorber [J]. *Chin. J. Lasers*, 2019, 46(8): 0808002-1-6. (in Chinese)
- [23] 魏荣妃. 类石墨烯纳米材料的制备与非线性光学特性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 22-29.
- WEI R F. *The Synthesis and Nonlinear Optical Properties of Graphene-Like Nanomaterials* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017: 22-29. (in Chinese)
- [24] YAN Y L, LI F F, GONG Y B *et al.*. Interlayer coupling affected structural stability in ultrathin MoS₂: an investigation by high pressure Raman spectroscopy [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2016, 120(43): 24992-24998.
- [25] LEE C G, 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.
- [26] LIU H, SUN Z, WANG X *et al.*. Several nanosecond Nd: YVO₄ lasers Q-switched by two dimensional materials: tungsten disulfide, molybdenum disulfide and black phosphorous [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(6): 6244-6252.
- [27] CHEN B H, ZHANG X Y, WU K *et al.*. Q-switched fiber laser based on transition metal dichalcogenides MoS₂, MoSe₂, WS₂ and WSe₂ [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(20): 26723-26737.



付鑫鹏(1990-) 男, 辽宁朝阳人, 博士, 2018 年于吉林大学获得博士学位, 主要从事二维层状半导体材料光电性能的研究。
E-mail: fuxinpeng@ciomp.ac.cn



付喜宏(1980-) 男, 内蒙古巴彦淖尔人, 博士, 研究员, 2008 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事激光技术及应用方面的研究。
E-mail: fuxh@ciomp.ac.cn