

基于可饱和吸收体 MoS_2 的固态 $\text{Tm}:\text{YAG}$ 被动调 Q 激光器

高攀^{1,2}, 黄见洪¹, 刘华刚¹, 翁文¹, 戴殊韬^{1,2}, 林文雄¹

¹中国科学院福建物质结构研究所光电材料化学与物理重点实验室, 福建 福州 350002;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 报道了一种以二维材料 MoS_2 作为可饱和吸收体的全固态 $\text{Tm}:\text{YAG}$ 被动调 Q 激光器。该激光器以 785 nm 窄线宽半导体激光器作为抽运源, 采用平平腔设计, 以 MoS_2 纳米片作为可饱和吸收体, 实现了 $2\ \mu\text{m}$ 波段的被动调 Q 运转。在吸收抽运功率达到 2.02 W 时, 获得了最大平均输出功率为 421 mW、最小脉冲宽度为 423 ns、重复频率为 49.36 kHz、最大单脉冲能量为 8.53 μJ 的脉冲激光输出。结果表明, MoS_2 是一种可适用于 $2\ \mu\text{m}$ 波段固态激光器的可饱和吸收体, 为产生近红外波段的脉冲激光提供了一种新的方法。

关键词 激光器; 被动调 Q ; 固态激光器; 可饱和吸收体; MoS_2

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0701002

Passively Q -Switched Solid-State $\text{Tm}:\text{YAG}$ Laser with MoS_2 as Saturable Absorber

Gao Pan^{1,2}, Huang Jianhong¹, Liu Huagang¹, Weng Wen¹, Dai Shutao^{1,2}, Lin Wenxiong¹

¹Key Laboratory of Optoelectronic Materials Chemistry and Physics, Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, Fujian 350002, China;

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

Abstract A passively Q -switched solid-state $\text{Tm}:\text{YAG}$ laser with MoS_2 as saturable absorber is reported. In this laser, a 785 nm narrow linewidth diode laser is taken as pump source, a plano-plano cavity is used, and MoS_2 nanosheets are served as saturable absorber. Passive Q -switching can be achieved successfully in $2\ \mu\text{m}$ wavelength region. When the absorbed pump power is at 2.02 W, the Q -switched laser pulses are obtained with the maximum average output power of 421 mW, the minimum pulse width of 423 ns, the pulse repetition rate of 49.36 kHz and the maximum pulse energy of 8.53 μJ . The results indicate that MoS_2 is a kind of saturable absorber that can be used in solid-state laser in $2\ \mu\text{m}$ wavelength region. Furthermore, it provides a potential way to obtain $2\ \mu\text{m}$ pulse laser.

Key words lasers; passively Q -switched; solid-state laser; saturable absorber; MoS_2

OCIS codes 140.3540; 140.3580; 140.3480; 160.4236

1 引言

脉冲激光在军事、医疗、激光加工等领域有着重要应用, 被动调 Q 和锁模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)、碳纳米管、石墨烯及新型二维材料。其中 SESAM 是比较成熟的可饱和吸收体, 已经被广泛应用于不同波段的被动调 Q 和锁模激光器中^[1-4]; 碳纳米管^[5] 和石墨烯^[6-7] 也有着越来越多的应用。近年来, 新型二维材

收稿日期: 2017-12-11; 收到修改稿日期: 2018-02-08

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1104500)

作者简介: 高攀(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事固体激光方面的研究。E-mail: gaopan@fjirsm.ac.cn

导师简介: 林文雄(1966—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光方面的研究。

E-mail: wxlin@fjirsm.ac.cn (通信联系人)

料,如:黑磷^[8-9]、拓扑绝缘体^[10-11]以及过渡金属二硫族化合物^[12-14]等,具有类石墨烯的二维结构,并具有较好的电学和光学性质,越来越受到人们的关注。相比于 SESAM 以及碳纳米管等,二维材料的制作成本较低,还具备短的恢复时间和可控的调制深度的特性,可作为调 Q 和锁模激光器的可饱和吸收体的绝佳材料。

二维材料 MoS₂ 纳米片的可饱和吸收特性在 2013 年被 Wang 等^[15]首次报道,之后在被动调 Q 和被动锁模激光器中有着越来越多的应用^[12-13,16-17]。2014 年,Luo 等^[12]以 MoS₂ 为可饱和吸收体,分别实现了在 1.0,1.5,2.0 μm 波段的光纤激光器的被动调 Q。2015 年,Chen 等^[13]利用以 MoS₂ 为可饱和吸收体的被动调 Q 光纤激光器获得了脉宽为 12.9 μs 的脉冲激光。2014 年,Liu 等^[16]将 MoS₂ 可饱和吸收体应用于光纤激光器中,成功实现了 1569.5 nm 波段的最短脉宽为 710 fs、重复频率为 12.09 MHz 的超短脉冲输出。另外,在固态激光器方面,2015 年,Sun 等^[17]以 MoS₂ 作为可饱和吸收体,获得脉宽为 420 ns、重复频率为 140 kHz 的中心波长处于 1030.5 nm 和 1050.4 nm 的全固态被动调 Q 激光器。

2 μm 波段的红外激光目前在医疗、军事、太空探索、材料加工等领域有着越来越多的应用,由于其波段位于水的吸收峰,非常适合在生物领域的应用,尤其是在医疗上的应用^[18-19]。掺铥(Tm³⁺)、掺钬(Ho³⁺)以及铥(Tm³⁺)钬(Ho³⁺)共掺激光器是获得 2 μm 波段激光的主要方法^[20-23]。无论在光纤激光器还是固态激光器中,均可以采用新型二维材料作为可饱和吸收体,输出 2 μm 波段的脉冲激光。2014 年,Luo 等^[12]在掺铥光纤激光器中以 MoS₂ 作为可饱和吸收体,得到脉宽为 1.76 μs、波长为 2.03 μm 的脉冲激光输出。2017 年,Lan 等^[24]在 Tm:CaYAlO₄ 激光器中,将 MoS₂ 作为可饱和吸收体,获得了脉宽为 0.48 μs、输出功率为 490 mW、单脉冲能量 4.87 μJ 的被动调 Q 脉冲激光输出。2017 年,基于 WS₂ 可饱和吸收体的 Tm:To:YLF 激光器在抽运功率为 2 W 时,输出 1895 nm 波段的脉宽为 4 μs、重复频率为 16.89 kHz、单脉冲能量为 5.21 μJ 的调 Q 激光脉冲^[25]。

Tm:YAG 固体激光器是一种有效获得 2 μm 波段的激光输出的方法,利用可饱和吸收体实现 Tm:YAG 固体激光器的被动调 Q,可以得到红外脉冲激光。本文报道了基于可饱和吸收体 MoS₂ 的

全固态 Tm:YAG 被动调 Q 激光器,输出脉冲激光的最窄脉宽为 423 ns,最大平均输出功率为 421 mW,最大单脉冲能量达到 8.53 μJ,最大重复频率为 49.36 kHz。

2 实验装置

如图 1 所示,实验采用光纤耦合的中心波长为 785 nm 的半导体激光器作为抽运源,光纤芯径为 400 μm,数值孔径为 0.22,抽运光通过准直聚焦系统进入激光晶体,聚焦光斑比为 1:1。激光谐振腔采用平平腔设计,腔长为 23 mm,由输入镜 IM、Tm:YAG 晶体和输出耦合镜 OC 组成。输入镜 IM 为平面镜,对 785 nm 增透、1.9~2.1 μm 高反。输出耦合镜 OC 为平面镜,对 1.9~2.1 μm 的透过率为 3%。所用晶体为 Tm:YAG,尺寸为 3 mm×3 mm×4 mm,Tm 原子数分数为 3.5%,晶体被包裹在钢箔中并安装在水冷铜块中,用恒温循环器使水温保持在 19 °C。将 MoS₂ 分散液涂覆在输出镜 OC 表面,作为可饱和吸收体。实验中所用的 MoS₂ 采用液相合成法制备^[17],图 2 为 MoS₂ 纳米片的二维结构的电镜扫描图(SEM),MoS₂ 纳米片呈明显的片状结构。

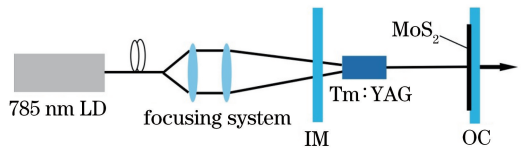


图 1 基于 MoS₂ 可饱和吸收体的 LD 抽运 Tm:YAG 调 Q 激光器示意图

Fig. 1 Schematic of the MoS₂-based LD-pumped passively Q-switched Tm:YAG laser

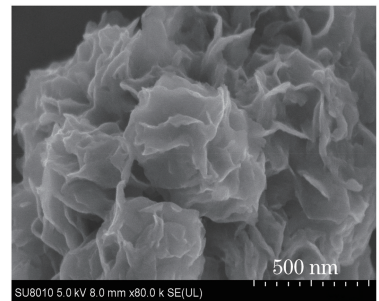


图 2 MoS₂ 纳米片的电镜扫描图

Fig. 2 SEM of the MoS₂ nanosheets

采用自制的 2 μm 声光调 Q 脉冲激光器,对可饱和吸收体 MoS₂ 在 2 μm 波段的光学性质进行了测量。通过测试可饱和吸收体前后的激光功率,得到功率透过比率,如图 3 所示,拟合的透过率曲线刚

好符合非线性可饱和吸收公式：

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

式中： $T(I)$ 为透过率； ΔT 为调制深度； I 为入射光的功率密度； I_{sat} 为饱和功率密度； T_{ns} 为非线性饱和损耗。通过拟合曲线与(1)式对比，可得可饱和吸收体的饱和功率密度为 2.57 MW/cm^2 ，调制深度为 12.17% ，非线性饱和损耗为 15.77% 。

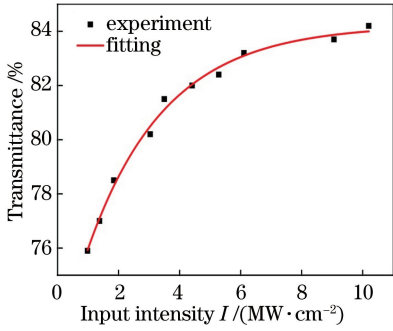


图 3 MoS₂可饱和吸收体在 2 μm 处的饱和吸收特性

Fig. 3 Saturable absorption characteristics of MoS₂ sample at 2 μm

3 实验结果与分析

在输出耦合镜没有涂覆饱和吸收体的情况下，激光器输出连续光(CW)，升高抽运功率时，激光器依然输出连续光。连续状态下激光器的平均输出功率随吸收抽运功率的变化曲线如图 4 所示，斜效率为 46.2% 。然后将耦合输出镜换成表面涂覆有 MoS₂可饱和吸收体的输出镜，随着抽运功率不断增大，开始出现稳定的调 Q 现象。调 Q 过程中，激光器的平均输出功率变化如图 5(a)所示，当吸收抽运功率达到 2.02 W 时，达到最大输出功率 421 mW ，

相应的斜效率为 21.2% 。

如图 5(b)所示，随着吸收抽运功率的增加，Tm:YAG 被动调 Q 激光器的输出脉冲宽度越来越窄，重复频率越来越高。吸收抽运功率的增加使激光晶体内的初始反转粒子数密度增加，从而减小脉冲的上升时间，整个脉宽被压缩。同时，激光上能级反转粒子数的积累和消耗过程随着吸收抽运功率的增加而加快，从而增大重复频率。当吸收抽运功率为 2.02 W 时，得到脉冲宽度为 423 ns 、重复频率为 49.36 kHz 的脉冲激光输出，脉冲序列图和单个脉冲图如图 6 所示。可饱和吸收体薄膜的不均匀性导致调 Q 过程中产生热积聚，从而使调 Q 脉冲的稳定性变差，此时脉冲的不稳定度为 10.8% 。当最大吸收抽运功率时，Tm:YAG 被动调 Q 激光的单脉冲能量达到 $8.53 \mu\text{J}$ ，这是目前以二维材料 MoS₂作为可饱和吸收体的 $2 \mu\text{m}$ 波段的固态激光器所达到的最大单脉冲能量。激光器输出波长如图 7 所示，中心波长为 2013.6 nm ，不随抽运功率的变化而变化。

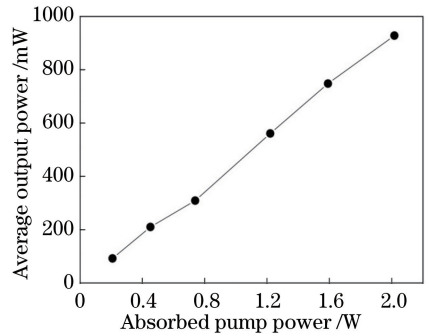


图 4 连续激光输出功率变化图

Fig. 4 Evolution of the output power in CW regime

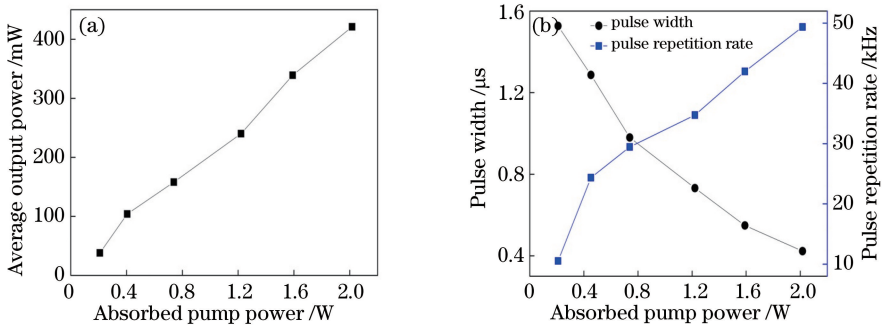


图 5 (a)调 Q 输出功率变化图；(b)脉冲宽度和重复频率变化图

Fig. 5 (a) Evolution of the output power in Q-switching regime; (b) evolution of pulse width and pulse repetition

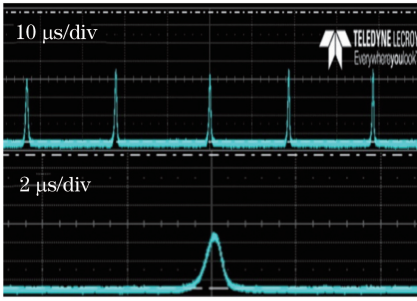


图 6 最大输出功率处的脉冲序列波形和单脉冲波形

Fig. 6 Pulse train waveform and single pulse waveform at the maximum output power

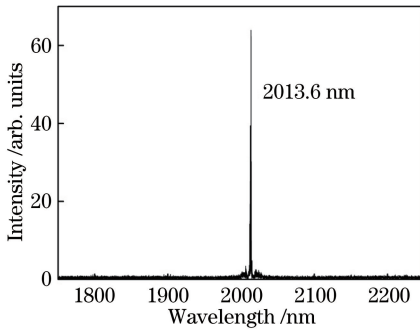


图 7 输出激光频谱图

Fig. 7 Spectrum of output laser

4 结 论

采用二维材料 MoS_2 作为可饱和吸收体, 成功实现了固态 $\text{Tm}:\text{YAG}$ 激光器的被动调 Q 运转。在吸收抽运功率为 2.02 W 时, 得到的调 Q 脉冲激光的最大平均输出功率为 421 mW, 最窄脉冲宽度为 423 ns, 重复频率为 49.36 kHz, 最大单脉冲能量为 8.53 μJ 。这是目前以 MoS_2 为可饱和吸收体、在 2 μm 波段全固态被动调 Q 激光器中得到的最短脉宽和最大单脉冲能量, 由此可证明 MoS_2 是一种在 2 μm 波段有效的可饱和吸收体。

参 考 文 献

[1] Diebold A, Emaury F, Schriber C, *et al.* SESAM mode-locked $\text{Yb}:\text{CaGdAlO}_4$ thin disk laser with 62 fs pulse generation[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(19): 3842-3845.

[2] Okhotnikov O G, Jouhti T, Kontinen J, *et al.* 1.5- μm monolithic GaInNAs semiconductor saturable-absorber mode locking of an erbium fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(5): 364-366.

[3] Gong M, Yu H, Wushouer X, *et al.* Passively mode-locked $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ picosecond laser with oblique incidence on SESAM [J]. *Laser Physics Letters*,

2008, 5(7): 514-517.

[4] Fluck R, Braun B, Gini E, *et al.* Passively Q -switched 1.34- μm $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ microchip laser with semiconductor saturable-absorber mirrors[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(13): 991-993.

[5] Yamashita S, Inoue Y, Maruyama S, *et al.* Saturable absorbers incorporating carbon nanotubes directly synthesized onto substrates and fibers and their application to mode-locked fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(14):1581-1583.

[6] Li X, Xu J, Wu Y, *et al.* Large energy laser pulses with high repetition rate by graphene Q -switched solid-state laser[J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9950-9955.

[7] Bonaccorso F, Sun Z. Solution processing of graphene, topological insulators and other 2D crystals for ultrafast photonics [J]. *Optical Materials Express*, 2013, 4(1): 63-78.

[8] Chen Y, Jiang G, Chen S, *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.

[9] Zhang H, He J, Wang Z, *et al.* Dual-wavelength, passively Q -switched $\text{Tm}:\text{YAP}$ laser with black phosphorus saturable absorber[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(7): 2328-2335.

[10] Luo Z, Huang Y, Weng J, *et al.* 1.06 μm Q -switched ytterbium-doped fiber laser using few-layer topological insulator Bi_2Se_3 as a saturable absorber [J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29516-29522.

[11] Xu J L, Sun Y J, He J L, *et al.* Ultrasensitive nonlinear absorption response of large-size topological insulator and application in low-threshold bulk pulsed lasers[J]. *Scientific Report*, 2015, 5: 14856.

[12] Luo Z, Huang Y, Zhong M, *et al.* 1-, 1.5-, and 2- μm fiber lasers Q -switched by a broadband few-layer MoS_2 saturable absorber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(24): 4077-4084.

[13] Chen B, Zhang X, Wu K, *et al.* Q -switched fiber laser based on transition metal dichalcogenides MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , and WSe_2 [J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26723-26737.

[14] Wang X, Xu J, You Z, *et al.* Tri-wavelength passively Q -switched $\text{Yb}^{3+}:\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ solid-state laser based on WS_2 saturable absorber [J]. *Optical Materials*, 2016, 62: 621-625.

[15] Wang K, Wang J, Fan J, *et al.* Ultrafast saturable absorption of two-dimensional MoS_2 nanosheets[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(10): 9260-9267.

[16] Liu H, Luo A P, Wang F Z, *et al.* Femtosecond

- pulse erbium-doped fiber laser by a few-layer MoS₂ saturable absorber [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4591-4594.
- [17] Sun Y, Xu J, Gao S, *et al.* Wavelength-tunable, passively Q-switched Yb³⁺:Ca₃Y₂(BO₃)₄ solid state laser using MoS₂ saturable absorber [J]. *Materials Letters*, 2015, 160: 268-270.
- [18] Godard A. Infrared (2-12 μm) solid-state laser sources: a review [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2007, 8(10): 1100-1128.
- [19] Scholle K, Lamrini S, Koopmann P, *et al.* 2 μm laser sources and their possible applications [M] // *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics B*. Pal: InTech, 2010: 471-500.
- [20] Kintz G J, Esterowitz L, Allen R. CW diode-pumped Tm³⁺, Ho³⁺:YAG 2.1 μm room-temperature laser [J]. *IEEE Electronic Letters*, 1987, 23(12): 616-617.
- [21] Liu X, Wang X, Wang L, *et al.* Realization of 2 μm laser output in Tm³⁺-doped lead silicate double cladding fiber [J]. *Materials Letters*, 2014, 125: 12-14.
- [22] Li L, Ju Y L, Dai T Y, *et al.* L-shaped single-longitudinal-mode Tm, Ho:YAG lasers based on twisted mode cavity [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 081408.
- 李莉, 鞠有伦, 戴通宇, 等. 基于扭转模腔的 L 形单纵模 Tm, Ho:YAG 激光器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(8): 081408.
- [23] Liu X, Cheng Y, Wan Q, *et al.* High temperature laser diode pumped all-solid-state laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0701003.
- 刘旭, 程勇, 万强, 等. 高温激光二极管抽运全固态激光器 [J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0701003.
- [24] Lan J, Zhang X, Zhou Z, *et al.* Passively Q-switched Tm:CaYAlO₄ laser using a MoS₂ saturable absorber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(6): 515-518.
- [25] Ling W J, Xia T, Dong Z, *et al.* WS₂ saturable absorber for passively Q-switched Tm, Ho:YLF 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.