

文章编号:1002-2082(2018)02-0279-05

基于 WS₂ 可饱和吸收体的脉冲激光器研究

姚杰,王勇刚,李永放

(陕西师范大学 物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710119)

摘要:利用 WS₂ 的可饱和吸收特性,在激光二极管侧面抽运 Nd : YAG 固体激光器 Z 型腔结构中分别实现了被动调 Q 和被调 Q 锁模运转。实验表明:当泵浦电流为 9.5 A 时,开始启动调 Q 运转,当泵浦电流大于 9.8 A 时,调 Q 激光脉冲趋于稳定。当泵浦电流为 12.8 A 时,被调 Q 输出的最大平均功率为 466 mW,最窄脉冲宽度为 3.205 μs,对应的重复频率为 71.70 kHz,此时最大单脉冲能量为 6.5 μJ。当泵浦电流达到 13.4 A 时,激光器实现调 Q 锁模运转。调 Q 锁模的最高输出功率为 590 mW,调 Q 包络频率为 71.98 kHz,单个调 Q 包络内的脉冲串重复频率 123.1 MHz,每个调 Q 包络中包含 369 个脉冲,单脉冲能量为 22.2 nJ。结果表明 WS₂ 材料可以作为可饱和吸收体用于固体激光器中。

关键词:WS₂ 可饱和吸收体;Nd : YAG 激光器;被调 Q 锁模

中图分类号:TN248.1

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201839.0207003

Pulse lasers based on WS₂ saturable absorber

Yao Jie, Wang Yonggang, Li Yongfang

(School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Based on the saturable absorption characteristics of WS₂, passively Q-switching and passively Q-switched mode locking operations of a side-pumped Nd : YAG solid-state laser were experimentally demonstrated in a self-designed Z-type four-mirror cavity structure. The Q-switching operation started under the pump current of 9.5 A and turned into a stable operation under more than 9.8 A. When the pump current was 12.8 A, the maximum average output power was 466 mW, the narrowest pulse width was 3.205 μs, the repetition frequency was 71.70 kHz, corresponding to the maximum pulse energy of 6.5 μJ. When the pump current was 13.4 A, a passively Q-switched mode locking operation was obtained. The maximum output power of passively Q-switched mode locking was 590 mW, the repetition rate of Q-switched pulse was 71.98 kHz, and the corresponding repetition rate of pulse train under single Q-switched pulse envelope was 123.1 MHz, and each Q-switched envelope contained 369 pulses with the single pulse energy of 22.2 nJ. The results show that the WS₂ material can act as the absorber for solid-state lasers.

Key words: WS₂ saturable absorber; Nd : YAG lasers; passive Q-switched mode locking

引言

二极管泵浦的全固态脉冲激光器具有高峰值

功率、短脉冲等优点,由于其广泛应用于材料加工、遥感、电信等领域从而引起越来越多的关

收稿日期:2017-03-29; 修回日期:2017-10-11

基金项目:中央高校基本业务费特别资助项目(GK201702005)

作者简介:姚杰(1992—),男,重庆市人,硕士研究生,主要从事超快固体激光器技术研究。

E-mail:yaojie99222@163.com

通讯作者:李永放(1958—),男,博士,教授,博导,主要从事激光光谱、非线性光学和量子光学等。

E-mail:yfl:@snnu.edu.cn

注^[1-3]。到目前为止,作为可饱和吸收体用于产生脉冲的材料有如下几类:一是过渡金属掺杂晶体材料,其代表类为掺 Cr⁴⁺ 材料^[4];二是半导体材料,半导体可饱和吸收镜^[5-6]则是典型代表。第三类可饱和吸收材料就是纳米材料,纳米材料的可饱和吸收体代表有:碳纳米管^[7]、石墨烯^[8]和拓扑绝缘体^[9]。然而它们也有缺点:工作波长窄,制备工艺复杂,材料昂贵等。

最近,二维材料过渡金属硫化物,如硫化钨(WS₂)^[10]、硒化钨(WSe₂)^[11]、硫化钼(MoS₂)^[12]等其可见红外波段的可调谐带隙特性在新型光电器件开发方面的独特优势得到了人们的关注。研究表明,WS₂ 材料也具有可饱和吸收特性,其与石墨烯相比拥有更强的非线性光学响应^[13]。WS₂ 外观看起来呈灰色的固体粉末,具有与石墨烯相似的润滑特性,润滑效果比二硫化钼好,可溶于热水,耐高压高温,并且具有半导体性与抗磁性双重性质。2015 年,Zhang M 等人采用液相剥离法制备 MoS₂-PVA 型可饱和吸收体器件,基于此吸收体在 1 535 nm~1 565 nm 波段实现了连续可调谐皮秒激光脉冲输出^[14]。2015 年,毛东等人首次将 WS₂ 作为可饱和吸收体材料应用于光纤激光器并且实现了超短脉冲输出^[15]。同年,X. Zheng 等人利用 Z 扫描的方法在 800 nm 处测量了单层 WS₂ 的非线性折射率,并在高功率下研究了其饱和吸收转向反饱和吸收的特性^[16]。

1 WS₂ 可饱和吸收体镜的制备

把 1.25 mg 的 WS₂ 粉末倒进水-乙醇的混合(比例 1:1)溶液,搅拌均匀。经过长达 5 h 的高功率超声作用,使 WS₂ 充分分散开来,WS₂ 被剥离成少层的纳米薄片,分散在水-乙醇混合溶液中。然后把超声后的溶液进行离心,使大块的 WS₂ 沉淀底部。静置 24 h 后,取溶液的上清液与事先准备好的浓度为 0.02 g/ml 的 PVA 溶液混合并超声 1 h。使用滴管把 WS₂-PVA 混合溶液滴在 1 064 nm 高反镜面上,最后把硫化钨可饱和吸收镜放入烘箱中烘干。将 WS₂ 与 PVA 相结合的方法制备出的吸收体表面更加平整,使吸收体内掺杂的 WS₂ 纳米片更加均匀,有利于实现稳定脉冲输出。图 1 为用北京普析通用公司的紫外可见分光光度计(型号:TU-1810pc)测得硫化钨可饱和吸收镜的

光谱吸收率。由图可知,WS₂ 饱和吸收镜对 1 064 nm 波段激光的吸收率为 2.124%,其中 WS₂-PVA 薄膜对光的吸收是 1.312%。图 2 为 WS₂ 的拉曼光谱图,表明振动模式 E_{2g}¹(平面上)和 A_g¹(平面外)各自位于 351.5 cm⁻¹ 和 416.2 cm⁻¹ 处,这 2 个峰的位置与报道的少层 WS₂ 是一致的,从而说明沉积在石英片上的 WS₂ 确实是被液相剥离出的少层结构。

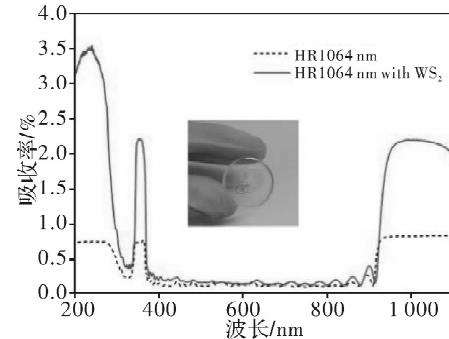


图 1 WS₂ 可饱和吸收镜吸收率

Fig. 1 Absorption of WS₂ saturable absorber mirror

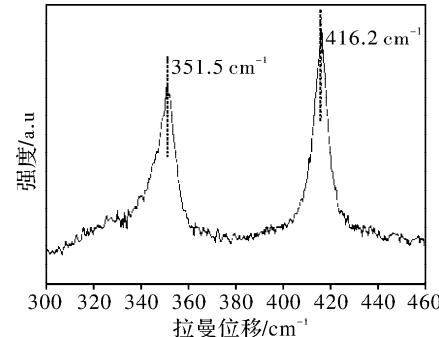


图 2 WS₂ 的拉曼光谱图

Fig. 2 Raman spectrum of WS₂

2 实验装置

实验装置如图 3 所示,LD 泵浦模块内激光棒为 Nd: YAG 晶体,掺杂 Nd³⁺ 浓度为 0.6at. %, 尺寸为 φ3 mm×100 mm。LD 侧泵采用北京医博康水冷装置(HX-2050)冷却,冷却水温控制在 16℃。腔镜 M₂ 为平凹镜,曲率半径为 400 mm,凹面镀有 1 064 nm 高反膜,为了使饱和吸收体 WS₂ 达到饱和启动调 Q 运转,在 WS₂ 前加入了曲率半径 R=100 mm 凹面反射镜 M₃,使得其焦点附近的聚焦光斑半径约 28.3 μm。M₃ 在 1 064 nm 波段的反射率大于 99.9%, M₁ 是对 1 064 nm 激光透射率为 5% 的平面输出镜,M₄ 为 WS₂ 可饱和吸收镜。

根据等效镜像法^[17],在已设计好的直线腔中

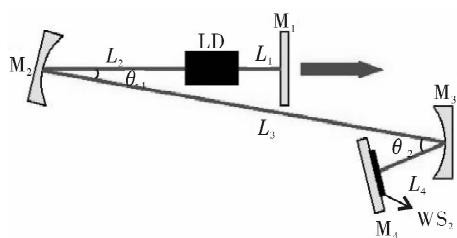
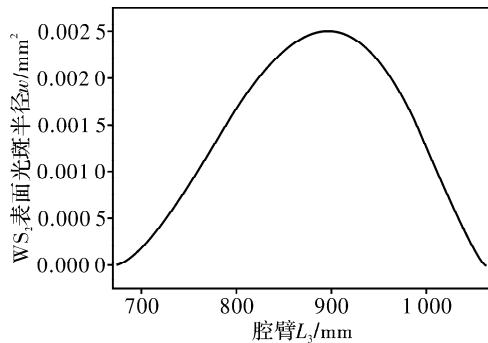
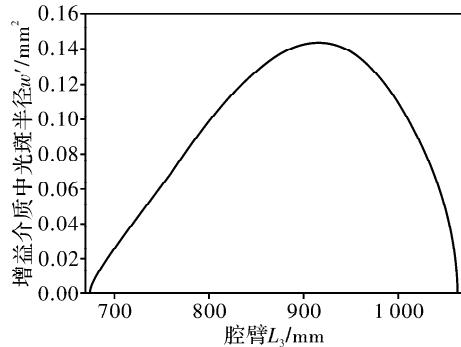


图 3 被动调 Q 锁模侧泵 Nd : YAG 固体激光器

Fig. 3 Schematic of side-pumped passive Q-switched mode locking Nd : YAG laser with WS₂

插入一个由两凹面全反镜 M_2 和 M_3 组成的望远镜系统。通过 ABCD 传输矩阵^[17]分析 WS_2 表面光斑半径 w 与增益介质中光斑半径 w' 随折叠臂 L_3 的变化,然后对各臂长进行调整。臂长 L_1 的长度决定 L_2 的稳区范围, L_1 越小 L_2 的稳区范围越大^[18],所以 L_1 取值 23 mm。图 4 为 WS_2 表面光斑面积 w 随 L_3 变化规律。图 5 为增益介质中光斑面积 w' 随 L_3 变化规律。

图 4 WS_2 表面光斑半径 w 随 L_3 变化规律Fig. 4 Spot radius w on WS_2 surface versus L_3 图 5 增益介质中光斑半径 w' 随 L_3 变化规律Fig. 5 Spot radius on gain medium surface versus L_3

另外考虑到 WS_2 表面光斑不能过小以至于损坏吸收体以及表面的光斑面积变化将极大地影响调 Q 激光的阈值,最终 L_3 取值 795 mm, L_2 取值 235 mm, L_4 取值 55 mm, 总腔长 1 218 mm。为了减小像散,两折叠角 θ_1 、 θ_2 均小于 8°。

3 实验结果分析与讨论

利用上述实验腔型结构进行实验。逐渐增大泵浦电流到 7.2 A 时,激光器开始有连续光输出;在电流为 9.5 A 时出现调 Q 脉冲,但此时并不稳定;继续增大泵浦电流,当电流为 9.8 A 时,用 Tektronix 公司的示波器(型号 TDSC000C)观察到调 Q 脉冲开始稳定,脉冲重复频率为 38.91 kHz,脉冲宽度为 6.06 μs,利用功率计测得此时激光器输出功率达 150 mW。图 6 为激光器在连续运转和调 Q 脉冲运转的输出功率随泵浦电流变化图。连续运转和调 Q 脉冲运转的输出功率分别与泵浦电流呈线性增大的关系,而两者不同的是,连续光的输出功率比调 Q 激光的输出功率大得多。平均输出功率上的差距主要是因为吸收体的插入损耗比较大。当泵浦电流为 12.8 A 时,得到 466 mW 的最大调 Q 输出功率。图 7 为实验过程中在泵浦电流为 11.2 A 下得到的较为典型的调 Q 脉冲序列图。实验过程中观察到,随着泵浦电流逐渐变大,激光器一定时间宽度上产生的调 Q 脉冲个数在不断增加;同时,随泵浦电流从 9.8 A 增加至 12.8 A,调 Q 脉冲的宽度有缩窄迹象。如图 8 所示,我们通过示波器测量并记录了整个调 Q 运转中脉冲重复频率与宽度的值。随着泵浦电流的增加,调 Q 脉冲重复频率从 38.91 kHz 增加至 71.70 kHz,整体上呈现出明显的上升趋势;而脉冲宽度由 6 μs 左右缩短至 3.205 μs,有逐渐下降的趋势。求得最短调 Q 脉冲的单脉冲能量与峰值功率为 6.5 μJ 和 2.03 W。

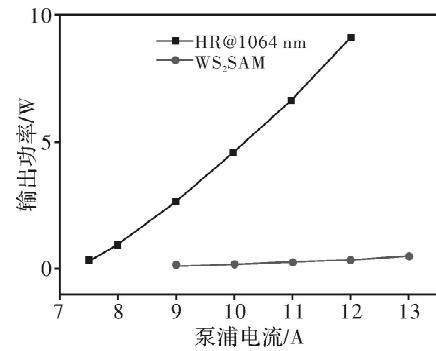


图 6 连续运转和调 Q 脉冲运转的输出功率随泵浦电流变化图

Fig. 6 Laser's output power versus pump current under CW operation and Q-switching operation

继续加大泵浦电流,当电流达 13.4 A 时,得到被动调 Q 锁模运转。在泵浦电流为 13.6 A 时,

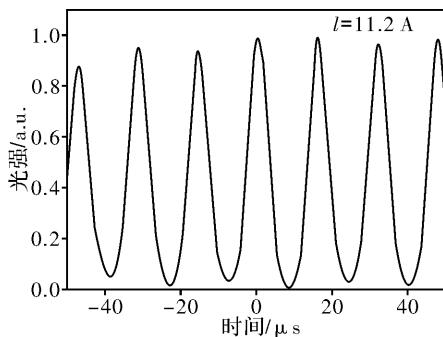
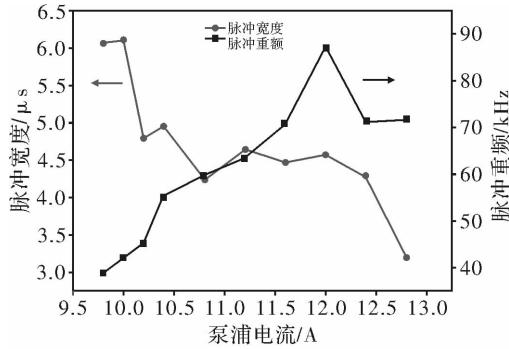
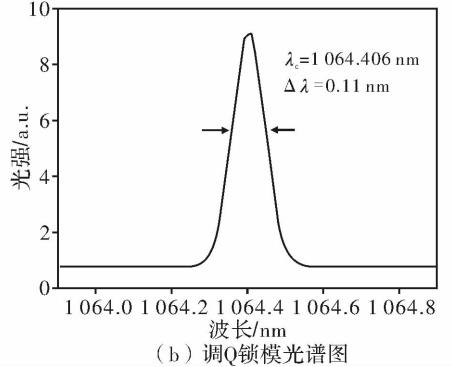


图 7 在泵浦电流 11.2 A 下的调 Q 脉冲图

Fig. 7 Q-switching pulse trains at pump current of 11.2 A

(a) WS₂ 调Q脉宽与重频随泵浦电流的变化图图 8 WS₂ 调 Q 激光器的脉宽、重频及光谱图Fig. 8 Pulse, repetition rate and spectrum of Q-switched mode WS₂ locking laser

调 Q 锁模达到最大输出功率 590 mW。从示波器上观察到调 Q 锁模波形如图 9 中的(a)和(b)所示,(a)图展示了调 Q 锁模的一个调 Q 包络,(b)图展示了调 Q 包络中的脉冲串序列。由图(a)可知,整体的大包络表现为调 Q 状态,调 Q 包络的频率为 71.98 kHz,包络宽度大约在 3 μs 左右。图(b)中所给时间范围内的脉冲串的重复频率为 123.1 MHz,经计算得到,每个大包络中大约有 369 个小脉冲,每个小脉冲的单脉冲能量为 22.2 nJ。用 Yokogawa 公司光谱仪(型号 AQ6370CD)测量被动调 Q 锁模激光输出波长如,中心波长为 1064.41 nm,且不随着泵浦电流的变化而发生变

化,谱线半高宽为 0.11 nm。在泵浦电流为 13.6 A 时,调 Q 锁模达到最大输出功率 590 mW。尝试进一步的提高泵浦电流,观察到示波器出现杂乱的调制现象,并观察到 WS₂-PVA 出现热损伤现象。

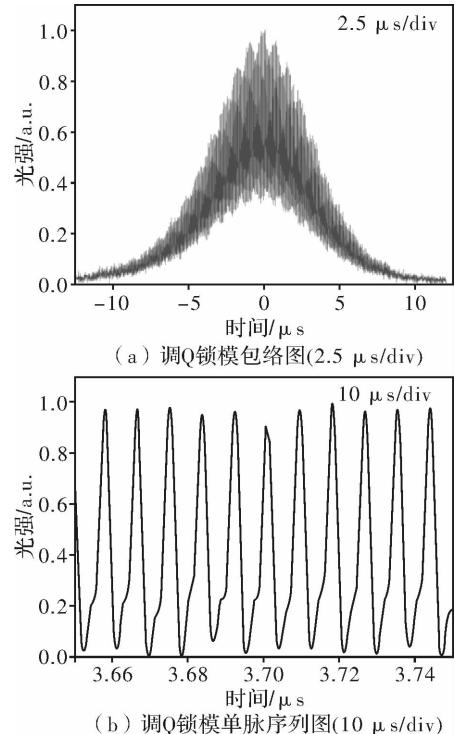


图 9 Nd : YAG 激光器调 Q 锁模脉冲图

Fig. 9 Q-switched pulse of Nd : YAG laser

4 结论

综上所述,本论文利用 WS₂ 可饱和吸收镜在 LD 侧面泵浦激光器中分别实现被动调 Q 和被动调 Q 锁模实验。调 Q 运转的泵浦阈值电流为 9.5 A。当泵浦电流达到 9.8 A 时,进入稳定的调 Q 脉冲运行状态。当泵浦电流达到 12.8 A 时,对应的调 Q 脉冲输出功率为 466 mW,最短调 Q 脉冲宽度为 3.205 μs,最大重复频率为 71.70 kHz,最大单脉冲能量为 6.5 μJ。当泵浦电流达 13.4 A 时,激光器进入调 Q 锁模状态,继续增加泵浦功率到 13.6 A,调 Q 锁模最高输出功率达 590 mW,单脉冲能量为 22.2 nJ。

参考文献:

- [1] PHILIPPE G, NAIL A. Dissipative solitons for mode-locked lasers[J]. Nat. Photonics, 2012, 6(2): 84-92.
- [2] LIU X. Soliton formation and evolution in passively-

- mode-locked lasers with ultra long anomalous dispersion fibers [J]. Physical Review A, 2011, 84 (2): 2345-2351.
- [3] SOTO-CRESPO J M, GRELLO P, AKHMEDIEV N. Dissipative rogue waves: extreme pulses generated by passively mode-locked lasers [J]. Phys. Rev. E, 2011, 84(2):016604.
- [4] LIU J H, OZYGUS B, YANG S H, et al. Efficient passive Q-switching operation of a diode-pumped Nd : GdVO₄ laser with a Cr⁴⁺ : YAG saturable absorber[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 2003, 20(4):652-661.
- [5] KELLER U, D MILLER A B, BOYD G D. New solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd : YLF lasers: antiresonant semiconductor Fabry-Perot [J]. Opt. Lett., 1992, 17(7):505-507.
- [6] DIEBOLD A, EMAURY F, SCHRIBER C, et al. SES-AM mode-locked Yb : CaGdAlO₄ thin disk laser with 62 fs pulse generation[J]. Opt. Lett., 2013, 38 (19): 3842-3845.
- [7] SET S Y, YAGUCHI H, TANAKA Y, et al. Laser mode locking using a saturable absorber incorporating carbon nanotubes[J]. Lightwave Technol, 2004, 22 (1):51-56.
- [8] FENG C, WANG Y, LIU J, et al. 3 W high-power laser passively mode-locked by graphene oxide saturable absorber [J]. Opt. Commun. 2013, 298-299: 168-170.
- [9] ZHANG G, QIN H, TENG J, et al. Quintuple-layer epitaxy of high-quality Bi₂Se₃ thin films for topological insulator[J]. Physics, 2009, 95(5):053114.
- [10] KLEIN A, TIEFENBACHER S, EYERT V, et al. Electronic band structure of single-crystal and single-layer WS₂: Influence of interlayer van der Waals interactions[J]. Phys. Rev. B., 2001, 64(20):205416.
- [11] ZHAO W, GHORANNEVIS Z, CHU L, et al. Evolution of electronic structure in atomically thin sheets of {WS₂} and {WSe₂} [J]. ACS Nano, 2012, 7 (1): 791-797.
- [12] YANG L. Preparation, characterization and photoelectrochemical property of ultrathin MoS₂ nanosheets via hydrothermal intercalation and exfoliation route[J]. Journal Alloys and Compounds, 2013, 571 (2):37-42.
- [13] SHENG L C, YUN Y, QING L Y, et al. Synthesis and tribological properties of WS₂ nanopartides[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2008, 24(2): 275-279.
- [14] ZHANG M, HOWE R, WOODWARD R, 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.
- [15] MAO D, WANG Y, MA C, et al. WS₂ mode-locked ultrafast fiber laser [J]. Sci. Rep., 2015, 5 (7965):7965.
- [16] ZHENG X, ZHANG Y, CHEN R, et al. Z-scan measurement of the nonlinear refractive index of monolayer WS₂ [J]. Opt. Express., 2015, 23 (12): 15616-15623.
- [17] HUA R Z, WADA S, TASHIRO H. Versatile, compact, TEM00-mode resonator for side-pumped single-rod solid-state lasers[J]. Applied Optics, 2001, 40 (15):2468-2474.
- [18] WANG Xi, WANG Yonggang, DUAN Lina, et al. LD side-pumped passive mode-locked Nd : YAG laser with semiconductor saturable absorption Mirror[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(7):0714001-1-4.
王茜,王勇刚,段丽娜,等. LD侧面泵浦半导体可饱和吸收镜被动锁模激光器[J]. 光子学报, 2015, 44 (7):0714001-1-4.