文章编号:1001-5078(2018)08-0939-06

·综述与评论·

硫化钼锁模激光器研究进展

孟路平¹,徐 慧¹,邹淑珍²,王令武²,史 萌¹,苏富芳¹,张 玲² (1. 曲阜师范大学物理工程学院,山东 曲阜 273165;2. 中国科学院半导体研究所全固态光源实验室,北京 100083)

摘 要:新型的硫化钼(MoS₂)可饱和吸收体由于具有宽带可饱和吸收特性等优点,在被动锁 模激光领域具有广泛的应用。本文对硫化钼可饱和吸收体的不同制备方法和锁模的关键参数 进行了总结、对基于硫化钼吸收体的锁模激光特性进行了综述,并指出其发展趋势。 关键词:硫化钼;可饱和吸收;被动锁模;固体和光纤激光器

中图分类号:TN248.1 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2018.08.001

Research progress of MoS₂ passive mode-locked laser

MENG Lu-ping¹, XU Hui¹, ZOU Shu-zhen², WANG Ling-wu², SHI Meng¹, SU Fu-fang¹, ZHANG Ling² (1. Institute of Physical Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China;

2. Laboratory of All-solid-state Light Sources, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The new type of molybdenum sulfide(MoS_2) saturable absorber has been widely used in the field of passive mode-locked laser owing to the advantages of broadband saturable absorption characteristics. In this paper, the different preparation methods and key parameters of mode locking of MoS_2 saturable absorber are summarized. The characteristics of the mode-locked laser based on the MoS_2 are reviewed. The development trend of passive mode-locked laser based on MoS_2 is pointed out.

 $\textbf{Key words:} MoS_2 \texttt{; saturable absorption; passively mode-locked; solid-state and fiber lasers}$

1 引 言

随着超快激光探测应用的兴起以及对高峰值功 率的追求,人们对激光光束的脉宽提出了更高的要 求。锁模激光器可以产生皮秒或飞秒级的超短脉 冲,在生物医学、基础科学、能源及国防等领域中具 有重要的应用^[1-6],尤其在柔性电路板制造、晶圆切 割、心血管支架及太阳能电池制造等激光精细加工 领域具有广泛的应用。被动锁模激光技术是获得超 快激光的有效方法。在被动锁模激光器的研究中, 锁模的关键元件—可饱和吸收体的研究至关重 要^[7-9]。半导体可饱和吸收镜是应用成熟的锁模元 件。但是半导体可饱和吸收镜的带宽窄,并且其制 备需要昂贵的外延生长技术和复杂的后期处理过 程,以减少恢复时间^[10]。因此,开发新颖、具有更好 光学性能的锁模材料,对被动锁模激光器的研究具 有重要的研究意义。

近年来,在凝聚态物理领域引起普遍关注的新 型二维材料如硫化钼作为新型可饱和吸收体的研究 备受关注^[11-15]。硫化钼属于过渡金属硫化物的一 种,具有二维的层状结构。单层的 MoS₂ 是两层硫 原子夹着一层钼原子的"三明治"夹心结构,层与层 之间靠范德华力结合在一起^[16-19]。块状 MoS₂ 材

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61605195;No. 11705101;No. 61675194);北京市自然科学基金项目(No. 4162061); 国家青年基金项目(No. 51702185);山东省博士基金项目(No. ZR2017BEM029)资助。

作者简介:孟路平(1991 –),女,硕士,主要从事锁模与倍频激光器方面的研究。E-mail:mlp@semi.ac.cn 通讯作者:苏富芳(1977 –),女,博士,主要从事激光物理与技术方面的研究。E-mail:sufufang628@163.com 收稿日期:2017-12-18;修订日期:2017-12-21

料是间接带隙材料,带隙宽度 1.29 eV(961nm),单 层 MoS₂ 材料是直接带隙材料,带隙宽度 ~1.80 eV (689nm),MoS₂ 材料中引入适当的缺陷,带隙宽度 范围可达到 1.8 ~0.8 eV(1550nm)。因此硫化钼可 饱和吸收体具有从可见光到近红外波段的宽带可饱 和吸收特性。

2 硫化钼锁模激光器研究进展

基于硫化钼可饱和吸收体的锁模激光器主要包 括光纤锁模激光器和固体锁模激光器^[20]。

2.1 硫化钼光纤锁模激光器

光纤激光器的单程增益较高,可以容忍较大的 非饱和损耗,因此关于硫化钼光纤锁模激光器的报 导较多。

韩国延世大学的 R. Khazaeizhad 等用化学气相 沉积法(CVD 方法)制备的多层硫化钼可饱和吸收 体在掺铒光纤激光器中实现了 637 fs 的锁模激光运 转^[21]。实验装置如图 1 所示。实验中对硫化钼吸 收体锁模的关键参数进行测试,其调制深度为 2.5%。在正色散域获得了稳定的耗散孤子脉冲输 出,输出的中心波长是 1563 nm,光谱带宽是 23.2 nm,重复频率 26.02 MHz,脉冲宽度为 4.98 ps;通过调整腔内的总色散,在反常色散域同样获得 了孤子脉冲,中心波长 1568 nm,光谱带宽 12.38 nm,重复频率 33.48 MHz,脉宽 637 fs。



图 1 硫化钼掺铒光纤激光器实验装置 Fig. 1 Experimental setup of MoS₂ erbium-doped fiber laser

2017年,巴西麦肯锡教会大学的 E. J. A IUB 等采用机械剥离方法(MHE)制备的硫化钼可饱和 吸收体放置在 D 形光纤上,在掺铒光纤激光器中获 得了波长 1560 nm、带宽 20.5 nm、重复频率 14.53 MHz 的窄脉宽 200 fs 光纤锁模激光输出^[22]。硫化 钼可饱和吸收体的调制深度是 0.2%,非饱和吸收 99%。图 2 为锁模激光的谱线宽度及脉冲宽度图。



Fig. 2 Spectral width and pulse width of mode-locked laser

2014年,深圳大学的 H. Zhang 等用 MoS₂ 水热 剥离方法(HTE 方法)制备的硫化钼可饱和吸收体, 如图 3 所示,在掺镱光纤激光器中通过将 MoS₂ 可饱 和吸收体插入环形腔,获得了中心波长 1054.3 nm 脉宽 800 ps 光谱宽度 2.7 nm 的光纤锁模激光输 出^[23]。使用开孔 Z 扫描和平衡检测测量技术来研 究几层 MoS₂ 的宽带可饱和吸收特性。对 MoS₂ 可 饱和吸收体的调制深度和饱和通量进行测量。实验 证明硫化钼可饱和吸收体在从可见光到近红外波段 有宽的可饱和吸收特性。





电子科技大学的 H. D. Xia 等采用 CVD 法制 备了多层高质量硫化钼可饱和吸收体,在掺铒光纤 激光器中实现了波长 1568.9 nm、光谱宽度 2.6 nm、 脉冲宽度 1.28 ps、重复频率 8.288 MHz 的孤子锁模 激光输出^[24]。MoS₂ 的调制深度为 35.4%,非饱和 损耗为 34.1%,饱和通量为 0.34 MW/cm²。锁模激 光的光谱和脉宽如图 4 所示。



图 4 光纤锁模激光的谱线宽度及脉冲宽度 Fig. 4 Spectral width and pulse width of fiber mode-locked laser

2015年,上海交通大学的 Z. Tian 等用液相剥 离法(LPE 法)制备多层硫化钼可饱和吸收体,在掺 铥光纤激光器线性腔中获得输出功率 150 mW 波长 2 μm 的光纤锁模激光^[25]。锁模激光的脉宽为 843 ps,重复频率为 9.67 MHz,光谱宽度为 17.3 nm,单 脉冲能量为 15.5 nJ。MoS₂ 吸收体的调制深度为 13.6%,饱和通量为 23.1 MW/cm²。



图 5 基于硫化钼吸收体的线性腔掺铥光纤激光器 Fig. 5 Experimental setup of thulium-doped fiber laser based on MoS₂

2016年,中国科学院西安光学精密机械研究所的 Y. G. Wang 研究组报导了基于新型硫化钼吸收体的铒掺杂的光纤锁模激光器。MoS₂ 薄膜的制备 是通过将 MoS₂、水、乙醇的混合物沉积在 D 型光纤 上。对 MoS₂ 吸收体的锁模参数进行测量,非饱和 损耗是 13.3%,饱和通量是 110 MW/cm²,调制深度 是 3.4%。实验获得了光谱宽度 11.7 nm、脉冲宽度 116 ps、重复频率 7.45 MHz、输出功率 6.91 mW 的 耗散孤子锁模脉冲^[26]。



图 6 示波器上锁模激光的脉冲序列 Fig. 6 The pulse train on oscilloscope of mode-locked laser

华南师范大学的 H. Liu 等用基于聚乙烯醇的 硫化钼可饱和吸收体,在掺铒光纤环形激光器中获 得了脉冲宽度 710 fs,中心波长 1569.5 nm 重复频 率 12.09 MHz 掺铒光纤锁模激光。通过调节腔的 色散,获得了脉冲宽度 710 fs~1.46 ps 的锁模脉 冲^[27]。MoS₂ 吸收体的饱和通量为 34 MW/cm²,调 制深度为 4.3%。





2.2 硫化钼固体锁模激光器

2016年,山东大学的 C. Feng 等用真空过滤方 法制备的硫化钼可饱和吸收体,在 Nd³⁺:YVO₄晶体 中实现了波长 1064.2 nm、重复频率 88.3 MHz 和脉 冲宽度 12.7 ps 的锁模激光运转^[28]。实验采用了 W 型谐振腔。在泵浦功率为 2.1 W 时获得的最大 输出功率为 89 mW,其单脉冲能量和峰值功率分别 为 1 nJ 和 83.3 W。MoS₂ 吸收体的调制深度测量为 7%,饱和通量为 847 nJ/m²。



2017年,中国科学院半导体研究所的 W. F. Zhao 等用 CVD 方法制备了单层硫化钼可饱和吸收体,其调制深度为 2%,非饱和损耗为 5%,1064 nm 波段的激光透过率为 92.9%。在 Nd:YVO₄激光器中实现了重复频率 79.5 MHz、单脉冲能量 3.7 nJ、输出功率为 295 mW 的固体锁模激光输出^[29]。实验结果表明由于该材料具有大尺寸、高透过率、低的非饱和损耗和高的损伤阈值,非常适合应用于固体锁模激光器。输出的锁模脉冲波形如图 10 所示。





图 10 基于硫化钼吸收体的固体锁模激光脉冲序列 Fig. 10 The pulse train of solid – state mode-locked laser based on MoS₂

3 硫化钼激光器的主要性能

表1是基于硫化钼可饱和吸收体的锁模激光器 性能指标。从表1可以看到:(1)硫化钼可饱和吸 收体的制备方法主要包括 CVD、THE、LPE 和真空过 滤方法等,实验中一般采用的是透射型的硫化钼吸 收体;(2)锁模激光脉冲宽度从皮秒到飞秒,工作波 长包括1 μm、1.5 μm 和2 μm;(3)基于硫化钼的光 纤锁模激光器主要是 Er 掺杂、Yb 掺杂、Tm 掺杂等, 谐振腔包括环形腔和线性腔,由于光纤激光器非线 性效应的影响,光纤锁模激光器一般采用的是多镜折 叠腔结构。

表1 基于硫化钼可饱和吸收体的锁模 激光器性能指标

Tab. 1 The performance parameters of mode-locked laser based on MoS_2 saturable absorber

Laser properties						l l
Laser Type (Mode-Locked)	Fabrication method	Wavelength (nm)	time	Repetition frequency	Output power	Ref
Er:Fiber	CVD	1568	637fs	33. 48MHz		[21]
Er:Fiber	MHE	1560	200fs	14.53MHz		[22]
Yb:Fiber	HTE	1054.3	800ps			[23]
Er:Fiber	CVD	1568.9	1.28ps	8. 288MHz		[24]
Tm:Fiber	LPE	2μm	843ps	9.67MHz	150mW	[25]
Er:Fiber			116ps	7.45 MHz	6. 91 mW	[26]
Er:Fiber		1569. 5	710fs – 1. 46ps	12.09MHz		[27]
$Nd^{3} + : YVO_{4}$	Vacuum Filtration	1064.2	12. 7ps	88. 3MHz	89mW	[28]
$\mathrm{Nd}:\mathrm{YVO}_4$	CVD	1064		79. 5MHz	295mW	[29]

4 结 论

综上所述,硫化钼是一种比较有前景的可饱和 吸收体,在被动锁模激光领域具有重要的意义。因 此,完善现有制备工艺、探索新的制备方法,实现性 能可控、高质量、高损伤阈值硫化钼的制备,从而实 现基于硫化钼的高功率被动锁模激光运转具有重要 的意义。对硫化钼材料进行全面而深刻的超快非线 性光子学性质研究是光子学领域里不可或缺的重要 环节,是光子信息器件和技术发展的原动力之一。

参考文献:

 WANG Huolei, KONG Liang, PAN Jiaoqing, et al. Recent progress of semiconductor mode-locked lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50 (5): 14 - 27. (in Chinese)

> 王火雷,孔亮,潘教青,等.半导体锁模激光器的最新 研究进展[J].激光与光电子学进展,2013,50(5): 14-27.

[2] ZHONG Yihui, ZHANG Zuxing, TAO Xiangyang, et al. Research progress of passively mode-locked fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(8):46-51. (in Chinese)

钟义晖,张祖兴,陶向阳,等,被动锁模光纤激光器的 研究进展[J].激光与光电子学进展,2008,45(8): 46-51.

[3] GAO Yue, SONG Qiuyan, CHEN Genxiang. Key technology and research progress in mode-locked laser[J]. Optical communication technology, 2015, 39 (3): 14 - 17. (in Chinese)

高月,宋秋艳,陈根祥.被动锁模激光器的关键技术与 研究进展[J].光通信技术,2015,39(3):14-17.

- [4] ZHAO Yu, LIU Yongzi, ZHAO Desuan. Evolution of mode-iocked technology of fiber lasers[J]. Laser Technology,2009,33(2):162-165. (in Chinese) 赵羽,刘永智,赵德双. 光纤激光器锁模技术研究进展 [J]. 激光技术,2009,33(2):162-165.
- [5] YU Yongqin, ZHENG Jiarong, DU Chenlin, et al. Research and progress of carbon nanotubes passively mode-iocked fiber laser [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(9): 953-960. (in Chinese)
 于永芹,郑家容,杜晨林,等,碳纳米管被动锁模光纤

激光器的研究进展[J]. 激光与红外, 2011, 41 (9): 953-960.

- [6] H Q Song, A Y Yang. Research progress of graphene passively mode-locked fiber lasers [J]. Laser & Infrared, 2013,43(2):137-143. (in Chinese)
 宋浩青,杨爱英. 石墨烯被动锁模光纤激光器的研究进展[J]. 激光与红外,2013,43(2):137-143.
- [7] U Keller, D A B Miller, G D Boyd, et al. Solid-state lowloss intracavity saturable absorber for Nd : YLF lasers: An antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber

[J]. Opt. Lett. 1992, 17:505 - 507.

- [8] L R Brovelli, U Keller, T H Chiu. Design and operation of antiresonant Fabry-Perot saturable semiconductor absorbers for mode-locked solid-state lasers [J]. J. Opt. Soc. Amer. B 1995, 12:311 – 322.
- [9] L Guo, W Hou, H B Zhang, et al. Diode-end-pumped passively mode-locked ceramic Nd : YAG Laser with a semiconductor saturable mirror [J]. Optics Express, 2005, 13:4058.
- [10] L Gao, T Zhu, W Huang, et al. Stable, Ultrafast pulse mode-locked by topological insulator Bi₂Se₃ nanosheets interacting with photonic crystal fiber: from anomalous dispersion to normal dispersion [J]. Photonics Journal, IEEE,2015,7(1):1-8.
- [11] 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.
- [12] L C Kong, G Q Xie, P Yuan, et al. Passive Q-switching and Q-switched mode-locking operations of 2 μm Tm: CLNGG laser with MoS₂ saturable absorber mirror [J]. Photon. Res., 2015, 3(2): A47 – A50.
- [13] G J Wang, Q Song, Y J Gao, et al. Passively Q-switched mode locking performance of Nd : GdTaO₄ crystal by MoS₂ saturable absorber at 1066 nm [J]. Appl. Optics, 2015,54(18):5829-5832.
- [14] T Lin, H Sun, X Wang, et al. Passively Q-switched Nd : YAG laser with a MoS_2 solution saturable absorber [J]. Laser Phys. ,2015, 25:125805.
- [15] C Cheng, H L Liu, Z Shang, et al. Femtosecond laser written waveguides with MoS₂ as satuable absorber for passively Q-switched lasing [J]. Optical Materials Express, 2016,6(2):367-373.
- [16] GU Pinchao, ZHANG Kailiang, FENG Yulin, et al. Recent progress of two-dimensional layered molybdenum disulfide[J]. Acta Physics Sinica, 2016, 65(1):018102.
 (in Chinese)
 顾品超,张楷亮,冯玉林,等. 层状二硫化钼研究进展
 [J]. 物理学报, 2016, 65(1):018102
- [17] C Ataca, H S ahin, S Ciraci Stable. Single-Layer MX₂ Transition-Metal Oxides and Dichalcogenides in a Honeycomb-Like Structure [J]. J. Phys. Chem. C, 2012, 116: 8983 - 8999.
- [18] K S Novoselov, D Jiang, F Schedin, et al. Two-dimensional atomic crystals [J]. Natl. Acad. Sci. USA, 2005, 102 (30):10451-10453.

- [19] B Radisavljevic, A Radenovic, J Brivio, V Giacometti and A Kis. Single-layer MoS₂ transistors [J]. Nat. Nanotechnol, 2011, 6(3):147-150.
- [20] Yaqin Jiang, Lili Miao, Guobao Jiang, et al. Broadband and enhanced nonlinear optical response of MoS₂/graphene nanocomposites for ultrafast photonics applications, Scientific RepoRts, 2015, 5:16372.
- [21] Reza Khazaeizhad, Sahar Hosseinzadeh Kassani, Hwanseong 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 regimes [J]. Opt. Express, 2014, 22(19):23732 - 23742.
- [22] Eduardo J. Aiub, David Steinberg, Eunézio A, et al. 200-fs mode-locked Erbium-doped fiber laser by using mechanically exfoliated MoS₂ saturable absorber onto D-shaped optical fiber[J]. Optics Express, 2017, 25(9):10546.
- [23] 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.
- [24] H D Xia, H P Li, C Y Lan, et al. Ultrafast erbium-doped

fiber laser mode-locked by a CVD-grown molybdenum disulfide (MoS_2) saturable absorber [J]. Opt. Express, 2014,22(14):17341 – 17348.

- [25] Z Tian, K Wu, L C Kong, et al. Mode-locked thulium fiber laser with MoS₂[J]. Laser Phys. Lett. ,2015,12:065104.
- [26] L N Duan, Y L Su, Y G Wang, et al. Passively modelocked erbium-doped fiber laser via a D-shape-fiber-based MoS₂saturable absorber with a very low nonsaturable loss
 [J]. Chin. Phys. B,2016,25(2):024206.
- [27] 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(15):4591-4594.
- [28] C Feng,X Y Zhang,J Wang, et al. Passively mode-locked Nd³⁺: YVO₄ laser using a molybdenum disulfide as saturable absorber [J]. Optical Materials Express, 2016, 6 (4):1365.
- [29] W F Zhao, H Yu, M Z Liao, et al. Large area growth of monolayer MoS₂ film on quartz and its use as a saturable absorber in laser mode-locking[J]. Semicond. Sci. Technol, 2017, 32:025013.