

新型过渡金属硫化物在超快激光中的应用

孙俊杰 陈飞 何洋 丛春晓 曲家沂 季艳慧 鲍赫

Application of emerging transition metal dichalcogenides in ultrafast lasers

SUN Jun-jie, CHEN Fei, HE Yang, CONG Chun-xiao, QU Jia-yi, JI Yan-hui, BAO He

引用本文:

孙俊杰, 陈飞, 何洋, 丛春晓, 曲家沂, 季艳慧, 鲍赫. 新型过渡金属硫化物在超快激光中的应用[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 647-659. doi: 10.37188/CO.2019-0241

SUN Jun-jie, CHEN Fei, HE Yang, CONG Chun-xiao, QU Jia-yi, JI Yan-hui, BAO He. Application of emerging transition metal dichalcogenides in ultrafast lasers[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 647-659. doi: 10.37188/CO.2019-0241

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2019-0241>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

新型二维材料在固体激光器中的应用研究进展

Advances in new two-dimensional materials and its application in solid-state lasers

中国光学. 2018, 11(1): 18 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0018>

超快激光制备生物医用材料表面功能微结构的现状及研究进展

Surface functional microstructure of biomedical materials prepared by ultrafast laser: a review

中国光学. 2019, 12(2): 199 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0199>

二维电子气等离子激元太赫兹波器件

Terahertz-wave devices based on plasmons in two-dimensional electron gas

中国光学. 2017, 10(1): 51 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0051>

电环形谐振腔表面几何参数对太赫兹超材料吸收体性能的影响

Influence of the geometric parameters of the electrical ring resonator metasurface on the performance of metamaterial absorbers for terahertz applications

中国光学. 2018, 11(1): 47 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0047>

双光子吸收碱金属蒸气激光器研究进展

Research progress on the two-photon absorption alkali vapor laser

中国光学. 2019, 12(1): 38 <https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0038>

电铸金属光栅中金属沉积过程的在线监测

In-situ monitoring of metal depositing in the fabrication of metallic grating

中国光学. 2019, 12(3): 606 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0606>

新型过渡金属硫化物在超快激光中的应用

孙俊杰¹, 陈飞^{1*}, 何洋¹, 丛春晓³, 曲家沂^{1,2}, 季艳慧^{1,2}, 鲍赫⁴

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200433;

4. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间光学研究二部, 吉林长春 130033)

摘要:超快激光技术是目前激光乃至物理学和信息科学领域最活跃的研究前沿之一,在工业加工、生物医学和激光雷达等领域具有广泛应用。二维材料具有独特的物理结构及优异的光电特性,作为可饱和吸收体应用于超快激光器时,具备工作波段宽、调制深度可控和恢复时间快等优势。其中,过渡金属硫化物因具有带隙连续可调等特点,已成为二维材料研究领域的重点。本文从过渡金属硫化物的特性出发,介绍了可饱和吸收器件的制作方法,综述了基于新型过渡金属硫化物的超快激光器的研究进展,并对其发展趋势进行了展望。

关键词:二维材料;过渡金属硫化物;可饱和吸收体;超快激光

中图分类号:TN248 文献标志码:A doi: 10.37188/CO.2019-0241

Application of emerging transition metal dichalcogenides in ultrafast lasers

SUN Jun-jie¹, CHEN Fei^{1*}, HE Yang¹, CONG Chun-xiao³, QU Jia-yi^{1,2}, JI Yan-hui^{1,2}, BAO He⁴

(1. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, 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 Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China;*

4. *Space Optical Department II, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*

* *Corresponding author, E-mail: feichenny@126.com*

收稿日期:2019-12-17; 修订日期:2020-02-07

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No.2016YFB0500100; No.2018YFE0203203); 国家自然科学基金面上项目(No. 61975203); 中科院青年创新促进会(No. 2017259); 民用航天预研项目(No. D040101)

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0500100; No. 2018YFE0203203); National Natural Science Foundation of China (No. 61975203); Youth Innovation Promotion Association of CAS (No. 2017259); Civil Aerospace Pre-research Project (No. D040101)

Abstract: Ultrafast laser technology is one of the most active research frontiers in lasers, physics and information science. It is widely applied in industrial processing, biomedicine, lidar and other fields. Because of their unique physical structure and excellent photoelectric properties, two-dimensional materials have a wide operating band, controllable modulation depth and short recovery time when they are employed as saturable absorbers in ultrafast lasers. Among them, transition metal dichalcogenides have become a focus of research because their band-gap is continuously adjustable. In this paper, we introduce the characteristics of transition metal dichalcogenides and the fabrication methods of saturable absorber devices. The research progress of ultrafast lasers based on emerging transition metal dichalcogenides is reviewed, and the development trend is highlighted.

Key words: two-dimensional materials; transition metal dichalcogenides; saturable absorber; ultrafast laser

1 引言

超快激光器能够输出超短脉冲激光, 脉冲持续时间为皮秒或飞秒量级, 具有在较低能量条件下获得极高峰值功率的特点, 广泛应用于工业加工、光通信、生物医学、激光雷达及非线性光学等领域^[1-8]。自 20 世纪 60 年代以来, 超快激光技术一直是国际激光领域的研究热点之一^[9]。超快激光器的实现方式主要有主动调制与被动调制, 具体包括调 Q 技术与锁模技术。相较于主动调制方式, 被动调制方式具备结构紧凑、成本低、调制范围大等优势, 已成为产生超快激光的主要技术途径。为实现激光的被动调 Q 与锁模, 需要的器件包括光开关、可饱和吸收体、非线性偏振旋转镜以及非线性放大环形镜^[10-17]等。其中, 可饱和吸收体利用材料的可饱和吸收特性实现对连续激光的调制, 学者们于上世纪 90 年代发明的半导体可饱和吸收镜因具有工作稳定、插入损耗小等特点, 作为可饱和吸收体在超快激光器中得到了广泛使用^[18-20]。然而, 半导体可饱和吸收镜制备工艺复杂、价格昂贵、可调制波段窄且调制深度等不易控制, 难以满足现阶段激光器宽波段调制的要求。

二维材料是新兴的光学材料, 其具有独特的单层或少层原子结构、极强的量子约束、优异的光电特性并且能够产生新奇的物理现象^[21-22]。近年来, 发展迅速的二维材料主要包括石墨烯、拓扑绝缘体、黑磷和过渡金属硫化物 (Transition Metal Dichalcogenides, TMDs) 等^[23-27]。其中, 由

于 TMDs 具有带隙连续可调等优势^[22], 可弥补石墨烯等材料在应用中的先天不足, 已成为二维材料研究领域中的重点研究对象。作为可饱和吸收体应用于超快激光器时, TMDs 具备工作波段宽、调制深度可控、恢复时间快以及非线性折射率高等优点, 是理想的脉冲调制器件。

早期应用于超快激光器的 TMDs 以 MoS₂、WS₂、MoSe₂ 和 WSe₂ 4 种材料为主^[28-29]。随着材料制备工艺的提升及研究的深入, 研究人员发现利用掺杂和构筑异质结构的方法可以有效改善 TMDs 的属性及能带结构, 进而拓展器件的应用范围, 因此, 越来越多的新型 TMDs 受到了广泛关注。本文对新型 TMDs 及其在超快激光器中的应用进行总结。首先, 简要介绍了 TMDs 的基本特性及 TMDs 可饱和吸收器件的制作方法; 其次, 重点总结和分析了基于新型 TMDs 的超快激光器; 最后, 展望了新型 TMDs 在超快激光器中应用的发展趋势。

2 过渡金属硫化物

二维过渡金属硫化物材料是一种 MX₂ 型仅有原子厚度的半导体层状材料, 一般具有 X-M-X 三明治结构, M 代表过渡金属元素 (Mo、W、Pt、Ti、Re、Te 等), X 代表硫族元素 (S、Se 或 Te), M-X 之间以较强的范德瓦尔斯力结合, X-X 之间以较弱的范德瓦尔斯力结合, 因此, 通过机械剥离法或液相剥离法可以直接获得单层或少层 TMDs^[30-31]。通常情况下, 少层 TMDs 为间接

带隙结构, 带隙宽度约为 1~2 eV^[22], 单层 TMDs 为直接带隙结构, 具有独特的光电特性, 发光效率高, 部分新型 TMDs 的带隙结构不随材料层数的变化而变化, 均为直接带隙结构。

单层或少层 TMDs 的制备方法与其他二维材料的制备方法相同, 包括微观机械剥离法^[32-33]、化学气相沉积法^[34-35]、热分解法^[36-38]、液相剥离法、锂离子插层法和脉冲激光沉积法^[39]。以上制

备方法大体上可以划分为剥离法和生长法两大类: 剥离法是通过机械、化学或分散液等手段从块状材料中分离出单层或少层 TMDs; 生长法是通过在特定基底上控制相关化学反应, 从而直接获得单层或少层 TMDs。其中, 液相剥离法和化学沉积法有利于大批量制备高质量的 TMDs 薄膜, 是目前最常用的制备方法。图 1 为化学沉积法制备的 TMDs 图像^[40]。

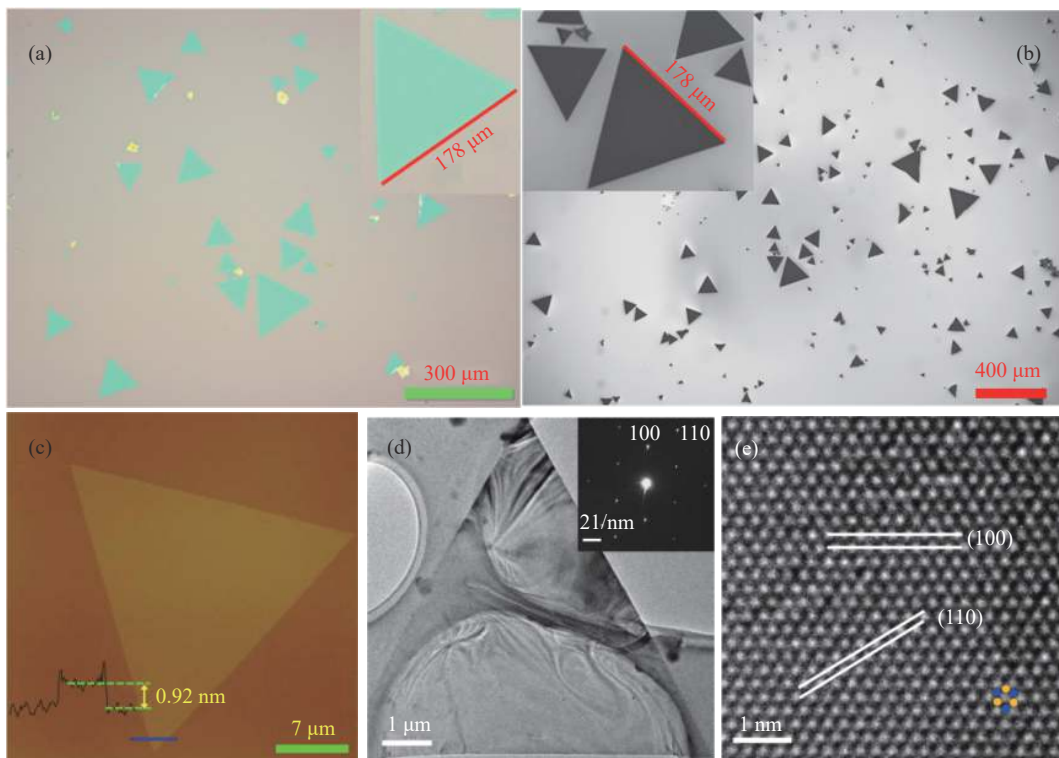


图 1 典型 TMD 图像。(a)光学图像;(b)扫描电镜图像;(c)原子力显微镜图像;(d、e)低倍、高倍透射电镜图像^[40]

Fig. 1 Typical images of TMD. (a) Optical image. (b) SEM image. (c) AFM image. (d, e) Low- and high-magnification TEM images

对 TMDs 薄膜的线性特性表征方式包括能量色散谱表征、电子能谱表征、拉曼光谱表征以及光致发光谱表征等。其中, 拉曼光谱表征具备快捷、方便、灵敏度高且不会对材料造成损伤等优势^[41-43], 且拉曼光谱表征能够直观表述 TMDs 等材料的层数及分子结构^[44-49], 这些优势为其应用于光电器件及超快激光器等领域提供了有力支撑。

3 可饱和吸收器件制作

为了将制备好的 TMDs 应用于激光器中以

实现超快激光输出, 需要根据材料制备方法及激光器结构选择合适的技术途径将其制作成可饱和吸收器件。本节分别对应用于固体激光器和光纤激光器的可饱和吸收器件制作方法进行了总结。

3.1 固体激光器可饱和吸收器件

固体激光器的结构相对简单, 可直接将可饱和吸收器件插入固体激光器的谐振腔内, 通过空间耦合进行激光脉冲调制。固体激光器输出功率较高, 因此, 在增大面积以降低能量密度的同时, 要求可饱和吸收体具有高损伤阈值。

通常, 高功率可饱和吸收器件的制作方法包

括两种:一种方法是直接将 TMDs 沉积在谐振腔镜或增益晶体上,操作难度大且腔镜和晶体使用受限;另一种方法是将生长完成的 TMDs 转移至目标基底,该方法应用灵活,是制作固体激光器中 TMDs 可饱和吸收器件最常用的方法。以化学气相沉积法制备的 TMDs 为例,转移过程如图 2

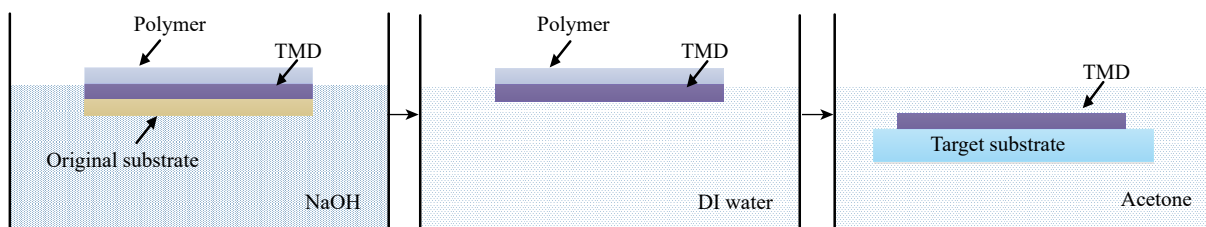


图 2 TMD 可饱和吸收体转移示意图

Fig. 2 Schematic diagram of transfer for TMD saturable absorber

3.2 光纤激光器可饱和吸收器件

在光纤激光器中, TMDs 可饱和吸收器件的制作方法主要有以下 4 种:

第一种方法,将制备完成的 TMD 附着于聚合物薄膜(PVA、PMMA 等)上,薄膜厚度约为几十微米^[54-57]。然后,将薄膜置于两个光纤接头之间构成透射式可饱和吸收器件,或置于光纤接头与反射镜之间构成反射式可饱和吸收器件。此种三明治结构的优点是激光与可饱和吸收体的相互作用面积大,利于脉冲调制。但是聚合物薄膜的热稳定性较差,高功率激光会改变其特性甚至损伤可饱和吸收体,因此应用受限。

第二种方法,采用转移法或光学沉积法将 TMD 直接转移至光纤端面上。具体操作与 3.1 节所述转移至固体基底的方法相同。光学沉积法是将光纤置于 TMD 沉积液中,光纤端面透射出的光场呈温度梯度分布, TMD 沿温度梯度方向移动进而附着在光纤端面上^[23]。采用此种方法可以增大激光与器件的相互作用面积,但存在污染或损伤光纤端面的风险,且光纤接头不能重复使用。

第三种方法,将 TMD 转移至 D 型光纤或锥形光纤中^[58]。TMD 位于 D 型光纤剖面或锥形光纤锥区内,与倏逝波相互作用。具有作用距离长,光密度低,对 TMD 损伤小的优点,然而其脉冲调

制效果取决于 TMD 与光纤的连接情况,因此容易导致脉冲调制的不稳定。

第四种方法,采用空芯光纤或光子晶体光纤作载体^[59-60],将 TMD 分散液填充至光纤内。待液体干燥后接入激光器内。该方法可以获得较长的相互作用距离,但不同光纤间耦合难度高,且液体残留会引入较大的插入损耗。

4 基于新型 TMDs 的超快激光器

近年来,超快激光器因其广泛的应用前景受到许多研究人员的青睐。实现超快激光输出的途径主要包括调 Q 技术和锁模技术,核心器件为脉冲调制器件。具备可饱和吸收特性的新型 TMDs 可以作为脉冲调制器件应用于超快激光器中,本节对基于新型 TMDs 的超快固体激光器和超快光纤激光器进行总结。

4.1 基于新型 TMDs 的超快固体激光器

固体激光器具有结构灵活、激光增益高、可覆盖波段宽、输出功率高等优点,在工业加工、光通信、非线性光学等领域具有广泛应用。2013 年,中国科学院上海光学精密机械与物理研究所的 Wang 等发现,以波长为 800 nm 的飞秒脉冲激发 MoS₂ 纳米片分散液时, MoS₂ 表现出明显的可饱和吸收特性^[61],这一发现开启了 TMDs 应用于

脉冲激光器的大门。2014年, TMDs 首次作为可饱和吸收体应用于超快固体激光器^[62], 基于 Nd: YAlO₃ 晶体实现了调 Q 激光输出, 证明了 TMDs 应用于超快固体激光器的能力。从此以后, 科研人员利用传统 TMDs (MoS₂、WS₂、MoSe₂ 和 WSe₂) 获得了从近红外到中红外波段的调 Q 或锁模超快固体激光输出。

随着材料制备工艺的提升以及应用需求的增长, 近三年来, 新型 TMDs 在超快光纤激光器中的应用愈加广泛。以 ReS₂ (Rhenium Disulfide) 为例进行说明, 研究表明 ReS₂ 具有特殊的弯曲 1T 结构, 层间耦合极弱^[63]。因此, 有别于传统 TMDs 带隙结构取决于材料层数^[64-65], 单层 ReS₂ 和块状 ReS₂ 均为直接带隙半导体, 带隙宽度几乎相同, 分别为~1.43 eV 和~1.35 eV^[66-67], 有利于超短脉冲激光的产生。早期研究主要集中于面向晶体管和探测器应用的光电特性和线性光学特性^[66, 68]。2017年, Xiancui Su 等^[69]首次将 ReS₂ 可饱和吸收体应用于全固态激光器, 获得的激光输出是基于二维材料的中红外调 Q 激光器中最短脉冲宽输出^[69], 激光波长为 2.8 μm、脉冲宽度为 403 ns。该项研究验证了 ReS₂ 在全固态激光器中具有优异的脉冲调制特性。典型的全固态脉冲激光器结构如图 3 所示, 包括泵浦源、泵浦耦合系统、谐振腔镜、增益介质及脉冲调制器件。2018年, 该研究团队探究了 ReS₂ 在可见光至中红外波段的可

饱和吸收特性, 结合不同晶体实现了 0.64 μm、1.064 μm 和 1.991 μm 三波长调 Q 激光输出, 并在 1 μm 波段首次验证了 ReS₂ 的锁模能力, 进一步说明了 ReS₂ 的宽波段脉冲调制特性^[70]。同年, Shuo Han 等采用 ReS₂ 可饱和吸收体, 在 Nd: YAG 晶体中实现了近红外波段双波长调 Q 激光输出^[70]。

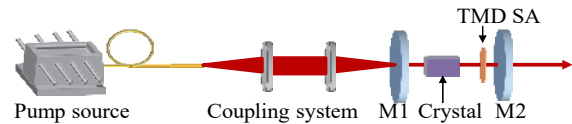


图 3 基于 ReS₂ 可饱和吸收体的固体激光器装置图
Fig. 3 Solid-state laser setup based on ReS₂ saturable absorber

2019年, Chunhua Zuo 团队^[44]和 Mingxi Lin 团队^[71]将 ReS₂ 可饱和吸收体应用于 Ho, Pr: LiLuF₄ 块状激光器和 Nd: YAG 激光器中, 分别在 2.95 μm 和 1.3 μm 处获得了脉冲宽度为 676 ns 的调 Q 激光输出, 进一步拓宽了 ReS₂ 的调制范围。

与 ReS₂ 同时发展的新型 TMDs 包括 PtSe₂、ReSe₂、MoTe₂、WTe₂ 及 TiS₂ 等, 将它们应用于 Tm: YAP、Nd: LuVO₄、Nd: YVO₄、Er: YAP、Tm: YLF 等固体激光器中, 分别获得了调 Q 与锁模激光输出。表 1 对新型 TMDs 的非线性特性及基于可饱和吸收体的超快固体激光器参数进行了总结。

表 1 基于新型 TMD 可饱和吸收体的超快固体激光器
Tab. 1 Ultrafast solid-state lasers with emerging TMD saturable absorbers

TMD	饱和能量	调制深度	调制方式	增益介质	中心波长	重复频率	脉冲宽度	单脉冲能量/平均功率	参考文献
ReS ₂	22.6 μJ/cm ²	9.7%	调Q	Er:YSGG	2.8 μm	126 kHz	324 ns	104 mW	[69]
	58.2 μJ/cm ²	3%	调Q/锁模	Pr:YLF、	调Q: 0.64 μm、 1.064 μm、1.991 μm, 锁模: 1.06 μm 0.95 μm/ 1.06 μm	调Q: 520 kHz、 644 kHz、67.7 kHz, 锁模: 50.7 MHz	调Q: 160 ns、 139 ns、415 ns, 锁模: 323 fs	调Q: 0.625 W、 1.34 W、8.72 W, 锁模: 350 mW	
	21.5 μJ/cm ²	5.2%		Nd:YAG、					
	2.7 μJ/cm ²	2.9%		Tm:YAP					
	11.89 GW/cm ²	48%		Nd:YAG					
23.5 μJ/cm ²	10.2%	调Q	Ho,Pr:LiLuF ₄	2.95 μm	91.5 kHz	676 ns	1.13 μJ	[44]	
15.6 μJ/cm ²	15%	调Q	Nd:YAG	1.3 μm	214 kHz	403 ns	0.42 μJ	[71]	
PtSe ₂	17.1 μJ/cm ²	12.6%	锁模	Nd:LuVO ₄	1066 nm	61.3 MHz	15.8 ps	180 mW	[72]
	3.2 μJ/cm ²	6.6%	调Q	Tm:YAP	1 987 nm	58 kHz	244 ns	24.3 μJ	[73]
	0.47 GW/cm ²	1.9%	调Q锁模	Nd:YAG	1064 nm	8.8 GHz	27 ps	127 mW	[74]

续表 1

TMD	饱和能量	调制深度	调制方式	增益介质	中心波长	重复频率	脉冲宽度	单脉冲能量/平均功率	参考文献
ReSe ₂	—	—	调Q	Tm:YLF/Tm:Y ₂ O ₃	1 900 nm/ 2 050 nm	54 kHz/ 106 kHz	527.9 ns/ 727 ns	862 mW/ 1.04 W	[75]
	12.8 GW/cm ²	2.9%	调Q	Nd:Y ₃ Al ₅ O ₁₂	1.06 μm	274 MHz	1.08 μs	2.5 μJ	[76]
	14.5 μJ/cm ²	7.5%	调Q	Er:YAP	2.73 μm/ 2.8 μm	244.6 kHz	202.8 ns	526 mW	[77]
	12.8 GW/cm ²	2.9%	锁模	固体波导	1 064 nm	6.5 GHz	29 ps	250 mW	[78]
	6.37 MW/cm ²	1.89%	调Q	Nd:YVO ₄	1 064.4 nm	84.16 kHz	682 ns	125 mW	[79]
MoTe ₂	4.3 μJ/cm ²	7.3%	调Q	Tm:YAP	2 μm	89.4 kHz	925.8 ns	17.6 μJ	[46]
	0.14 mJ/cm ²	22%	调Q	Ho,Pr:LiLuF ₄	2.95 μm	76.46 kHz	670 ns	0.95 μJ	[80]
	1.71 MW/cm ²	—	调Q	Yb:LaCa ₄ O(BO ₃) ₃	1.03 ~ 1.04 μm	357 kHz	103 ns	6.6 μJ	[81]
	18 MW/cm ²	4%	调Q	Tm:CaYAlO ₄	1 929 nm	70.9 kHz	0.69 μs	10.58 μJ	[82]
	6.87 mJ/cm ²	1.3%	调Q	Er:YAG	1 645 nm	41.59 kHz	1.048 μs	27.4 μJ	[83]
	2.26 μJ/cm ²	6.0%	调Q	Tm:YAP	2 μm	144 kHz	380 ns	8.4 μJ	[84]
	1.71 MW/cm ²	0.9%	调Q	Yb:YCOB	1.03 μm	704 kHz	52 ns	2.25 μJ	[85]
WTe ₂	1.71 MW/cm ²	0.9%	调Q	Yb:KLu(WO ₄) ₂	1 030.6 nm	2.18 MHz	36 ns	1.3 μJ	[86]
	5.1 μJ/cm ²	7.2%	调Q	Tm:YAP	1 938 nm	78 kHz	368 ns	4.8 μJ	[87]
TiS ₂	1.97 mJ/cm ²	20.9%	调Q	Ho,Pr:LiLuF ₄	2 954.7 nm	92 kHz	366 ns	1.4 μJ	[88]
	3.37 mJ/cm ²	8%	调Q	Er:YAG	1 645 nm	38 kHz	1.2 μs	37.4 μJ	[89]

TMDs 本身的带隙相对较大, 对应可见光谱, 作为可饱和吸收体应用于调 Q、锁模激光器时, 吸收波长多为近红外至中红外波段, 尽管材料本身在该波段内没有响应, 但是在一定范围内引入缺陷可以改变带隙大小, 使其在近红外波段至中红外波段产生非线性吸收。

4.2 基于新型 TMDs 的超快光纤激光器

光纤激光器具有光束质量好、稳定性高、散热性能好、转换效率高等优点, 在军事、激光医疗、激光雷达等领域具有广泛应用。TMDs 于 2014 年开始作为可饱和吸收体应用于光纤激光器^[90], 其中, 利用 MoS₂、WS₂、MoSe₂ 和 WSe₂ 已经获得从近红外到中红外波段的调 Q 或锁模超快光纤激光输出。

在采用新型 TMDs 实现超快固体激光输出的同时, 基于新型 TMDs 的光纤激光器也得到了广泛研究。以直接带隙材料 ReS₂ 为例, 2017 年, Yudong Cui 等首次验证了 ReS₂ 在红外波段的非线性吸收特性, 并成功将其应用于掺铒光纤激光器中^[91], 实现了中心波长为 1 564 nm、重复频率

为 3.43 MHz、脉冲宽度为 1.25 ps 的锁模激光输出。基于新型 TMDs 的环形腔光纤激光器的一般结构装置如图 4 所示, 主要包括半导体泵浦源、单模光纤、掺杂光纤、光纤耦合器、光隔离器及可饱和吸收器件。

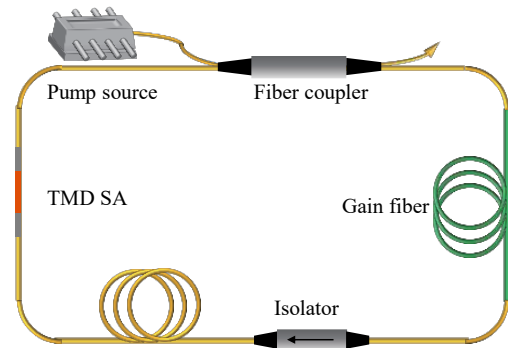


图 4 基于 ReS₂ 可饱和吸收体的光纤激光器装置示意图
Fig. 4 Schematic of fiber laser setup based on ReS₂ saturable absorber

随后, D. Mao 等采用 ReS₂ 可饱和吸收体实现了调 Q 光纤激光输出, 中心波长为 1 558.6 nm, 且重复频率和脉冲宽度可调谐^[92]。接着, F. F.

Lu 等开展了光纤激光器谐波锁模技术的研究^[93], 研究结果进一步表明了 ReS₂ 应用于超快光纤激光器的独特优势。2018 年, Ruwei Zhao 等实现了 1.5 μm 波段多波长锁模激光输出, 实验结果表明, ReS₂ 可饱和吸收体具备产生亮暗孤子对的能力^[94]。而后, Baole Lu 等首次将 ReS₂ 可饱和吸收

体应用于掺镱光纤激光器, 获得了 1 μm 调 Q 激光输出, 证明了 ReS₂ 的宽带可饱和吸收特性^[95]。

其他应用于超快光纤激光器的新型 TMDs 包括 PtSe₂、ReSe₂、MoTe₂、WTe₂ 及 TiS₂ 等。表 2 对目前基于新型 TMDs 可饱和吸收体的超快光纤激光器的参数和特性进行了总结。

表 2 基于新型 TMD 可饱和吸收体的超快光纤激光器
Tab. 2 Ultrafast fiber lasers with emerging TMD saturable absorbers

TMD	饱和能量	调制深度	调制方式	光纤掺杂	中心波长	重复频率	脉冲宽度	单脉冲能量/平均功率	参考文献
ReS ₂	27 μJ/cm ²	1%	锁模	Er	1 564 nm	3.43 MHz	1.25 ps	—	[91]
	74 MW/cm ²	0.12%	调Q/锁模	Er	1 558.6 nm	12.6 ~ 19 kHz/ 5.48 MHz	23 ~ 5.49 μs/1.6 ps	22 ~ 62.8 μJ	[92]
	—	—	锁模	Er	1.5 μm	1.896 MHz	—	12 mW	[93]
	8.4 MW/cm ²	44%	调Q	Yb	1 047 nm	134 kHz	1.56 μs	13.02 nJ	[94]
	27.5 μJ/cm ²	6.9%	锁模	Er	1 573.6 nm/ 1 591.1 nm/ 1 592.6 nm	13.39 MHz	—	—	[95]
PtSe ₂	0.346 GW/cm ²	26%	锁模	Yb	1 064.47 nm	4.08 MHz	470 ps	2.31 nJ	[96]
	9.48 MW/cm ²	6.9%	锁模	Er	1 550 nm	8.24 MHz	861 fs	78.52 nJ	[45]
	0.34 ~ 1.23 GW/cm ²	1.11% ~ 4.9%	调Q/锁模	Er	1 560 nm	锁模: 23.3 MHz	锁模: 1.02 ps	调Q: 143.2 nJ 锁模: 0.53 nJ	[97]
ReSe ₂	—	—	调Q	Yb	1.06 μm	17.89 ~ 39.86 kHz	2.27 μs	30.4 nJ	[98]
	—	3.9%	锁模	Er	1 560 nm	14.97 MHz	862 fs	0.5 mW	[99]
	—	7%	调Q	Er	1 566 nm	16.64 kHz	4.98 μs	36 nJ	[100]
MoTe ₂	3.46 MW/cm ²	48.85%	锁模	Er	1 559 nm	1.8 MHz	2.46 ps	0.11 mW	[101]
	0.969 MW/cm ²	26.97%	锁模	Er	1 561 nm	96.323 MHz	111.9 fs	23.4 mW	[102]
	26.45 MW/cm ²	17.47%	调Q	Er	1 559 nm	148 ~ 228 kHz	677 ns	109 nJ	[103]
	8.3 MW/cm ²	5.7%	锁模	Tm	1 930 nm	14.353 MHz	952 fs	2.56 nJ	[47]
	9.6 MW/cm ² @ 1.5 μm, 12.3 MW/cm ² @2 μm	25.5%@1.5 μm, 22.1%@ 2 μm	锁模	Er/Tm	1.5 μm/2 μm	25.601 MHz/ 15.37 MHz	229 fs/1.3 ps	2.14 nJ/13.8 nJ	[104]
WTe ₂	7.6 MW/cm ²	31%	锁模	Tm	1 915.5 nm	18.72 MHz	1.25 ps	39.9 mW	[48]
	—	2.18%	调Q	Yb	1 044 nm	19 ~ 79 kHz	1 μs	28.3 nJ	[105]
	0.515 MW/cm ²	31.06%	调Q	Er	1 531 nm	144.7 ~ 240 kHz	583 ns	58.625 nJ	[106]
TiS ₂	—	8.3%	锁模/调Q	Er	1 563.3 nm/ 1 560.2 nm	22.7 MHz/ 33.387 kHz	1.25 ps/4.01 μs	25.3 pJ/9.5 nJ	[107]
	772.2 GW/cm ²	—	锁模	Er	1 550 nm	5.7 MHz	618 fs	0.28 ~ 1.2 mW	[49]

5 总结与展望

本文介绍了过渡金属硫化物的物理特性, 阐述了 TMD 可饱和吸收器件的制作方法, 归纳了

基于新型 TMDs 的超快激光器的研究进展。

在固体激光器中, 增益介质包括掺杂 Nd、Yb、Er、Tm、Ho、Pr 离子的多种晶体, 输出激光覆盖近红外至中红外波段(1~3 μm)。文中涉及到的新型 TMDs 作为可饱和吸收体均实现了调

Q 激光输出, 最短调 Q 脉冲宽度为 36 ns; 只有 ReS_2 与 ReSe_2 作为可饱和吸收体实现了锁模激光输出, 最短锁模脉冲宽度为 323 fs。

在光纤激光器中, 以掺 Er、掺 Yb 光纤激光器的脉冲调制研究为主, 实现了最短脉冲宽度为 111.9 fs 的 1~1.5 μm 波段的激光输出; MoTe_2 与 WTe_2 可饱和吸收体应用于掺 Tm 光纤激光器, 获得了最短脉冲宽度为 952 fs 的 2 μm 波段激光输出。

综上所述, 新型 TMDs 在超快激光领域已获得了广泛应用, 实现了多波段的调 Q 和锁模激光输出。固体激光器以调 Q 技术为主, 其原因是 TMDs 的固有吸收损耗较大, 固体介质受尺寸制约增益有限, 产生锁模所需强度的非线性效应较为困难。然而, 固体激光器的增益介质种类丰富, 基于不同晶体实现了宽谱段超快激光输出, 验证了新型 TMDs 的宽带饱和吸收特性。光纤激光器中, 已实现的波段具有局限性, 且 TMDs 尺寸受限于光纤纤芯直径, 为避免材料损伤, 激光功率通常较低。另一方面, 通过增加掺杂光纤长度能够提高增益, 进而弥补材料损耗, 因此较易实现锁模激光输出, 新型 TMDs 的非线性调制能力已得到验证。

目前, 新型 TMDs 应用于超快激光器的研究仍处于起步阶段, 在过渡金属硫化物家族中, 对于大部分材料饱和吸收特性的研究尚未展开, 更多新奇的物理特性等待研究人员发掘。除此之外, 未来主要研究方向包括以下几方面:

参考文献:

- [1] SIBBETT W, LAGATSKY A A, BROWN C T A. The development and application of femtosecond laser systems[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 6989-7001.
- [2] YE J. Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(10): 1153-1155.
- [3] 岱钦, 毛有明, 吴凯旋, 等. 脉冲激光测距中高速精密时间间隔测量研究[J]. *液晶与显示*, 2015, 30(1): 83-88.
DAI Q, MAO Y M, WU K X, et al.. High speed and high precision time-interval measurement system in pulsed laser ranging[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1): 83-88. (in Chinese)
- [4] 高慧, 赵佳宇, 刘伟伟. 超快激光成丝现象的多丝控制[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 698-607.
GAO H, ZHAO J Y, LIU W W. Control of multiple filamentation induced by ultrafast laser pulse[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(3): 698-607. (in Chinese)
- [5] TRÄGER F. *Handbook of Lasers and Optics*[M]. 2nd ed. New York: Springer, 2012.
- [6] 姜可, 谢冀江, 杨贵龙, 等. GaSe晶体的双光子吸收对太赫兹输出的影响[J]. *发光学报*, 2015, 36(3): 361-365.
JIANG K, XIE J J, YANG G L, et al.. Two-photon absorption attenuated THz generation in GaSe[J]. *Chinese Journal*

(1)材料性能提升。现有新型 TMDs 材料普遍具有损伤阈值低、可重复性差的缺点, 不利于激光功率及稳定性的提升。通过改进制备方法、引入掺杂元素、结合其他材料构筑异质结等方式可以提升材料性能, 获得可重复制备的吸收带宽更宽、恢复时间更短、稳定性更好的高性能材料。

(2)新特性及机理研究。基于新型 TMDs 的超快激光器研究集中于 TMDs 的饱和吸收特性及实验研究, 对材料开展偏振特性等新特性研究能够拓宽其在超快激光领域的应用, 开展脉冲调制机理研究对影响因素进行理论剖析, 有利于从原理上提升其性能。

(3)宽谱段及商业应用。目前新型 TMDs 作为可饱和吸收体的应用集中于近红外波段, 利用其宽谱段调制特性, 结合新型激光体制及非线性频率变换技术可将波长拓展至可见至中红外波段, 此外, 目前新型 TMDs 在超快激光中的应用处于实验室研究阶段, 提高其稳定性等性能后将向商业应用发展。

自二维石墨烯材料应用于超快激光以来, 有关二维材料饱和吸收特性的研究得到了飞速发展。新型过渡金属硫化物因其独特的物理特性, 为开拓二维材料对激光调制的新效应、新应用提供了新机遇, 随着其性能的提升及对调制机理的深入研究, 新型过渡金属硫化物在超快激光中的应用将得到更大的发展。

- of Luminescence*, 2015, 36(3): 361-365. (in Chinese)
- [7] TANTER M, TOUBOUL D, GENNISSON J L, *et al.*. High-resolution quantitative imaging of cornea elasticity using supersonic shear imaging[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2009, 28(12): 1881-1893.
- [8] CHOU S Y, KEIMEL C, GU J. Ultrafast and direct imprint of nanostructures in silicon[J]. *Nature*, 2002, 417(6891): 835-837.
- [9] KELLER U. Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 831-838.
- [10] 李景照, 陈振强, 朱思祁. 基于Yb: YAG/Cr⁴⁺: YAG/YAG键合晶体的被动调Q激光器[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(1): 55-61.
- LI J ZH, CHEN ZH Q, ZHU S Q. Passively Q-switched laser with a Yb: YAG/Cr⁴⁺: YAG/YAG composite crystal[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(1): 55-61. (in Chinese)
- [11] 程秀凤, 陈丽娟, 韩树娟, 等. LD端面泵浦Nd: LiGd(MoO₄)₂晶体的主动调Q脉冲激光特性[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 836-840.
- CHENG X F, CHEN L J, HAN SH J, *et al.*. Actively Q-switched pulse laser from LD end-pumped Nd: LiGd(MoO₄)₂ crystals[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(4): 836-840. (in Chinese)
- [12] 王加贤, 庄鑫巍. 基于半导体可饱和吸收镜实现闪光灯抽运Nd: YAG激光器的被动调Q与锁模[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 584-588.
- WANG J X, ZHUANG X W. Passive Q-switching and mode-locking in a flashlamp-pumped Nd: YAG laser with semiconductor saturable absorption mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(4): 584-588. (in Chinese)
- [13] 余锦, 刘伟仁. 1.0 μm掺钕介质全固化调Q脉冲激光技术[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(2): 297-302.
- YU J, LIU W R. All-solid-state Q-switched lasers with Nd³⁺-doped crystals oscillating at 1.0 μm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(2): 297-302. (in Chinese)
- [14] 王蓓, 王国政, 刘洋, 等. 全光纤声光调Q钕共掺双包层光纤激光器[J]. *发光学报*, 2008, 29(6): 1018-1022.
- WANG J, WANG G ZH, LIU Y, *et al.*. All-fiber acousto-optic Q-switched Er³⁺/Yb³⁺ co-doped double-cladding fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2008, 29(6): 1018-1022. (in Chinese)
- [15] 王国立, 郭亨群, 苏培林, 等. nc-Si/SiN_x超晶格薄膜实现Nd: YAG激光器调Q和锁模[J]. *发光学报*, 2008, 29(5): 905-909.
- WANG G L, GUO H Q, SU P L, *et al.*. Passive Q-switching and mode locking of pulsed Nd: YAG laser with nc-Si/SiN_x multilayer[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2008, 29(5): 905-909. (in Chinese)
- [16] 张伶俐, 孙秀冬, 刘永军, 等. 具有外部谐振腔的胆甾相液晶激光器的研究[J]. *液晶与显示*, 2013, 28(5): 679-682.
- ZHANG L L, SUN X D, LIU Y J, *et al.*. Cholesteric liquid crystals laser with external cavity[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(5): 679-682. (in Chinese)
- [17] 苏晶, 刘玉荣, 莫昌文, 等. ZnO基薄膜晶体管有源层制备技术的研究进展[J]. *液晶与显示*, 2013, 28(3): 315-322.
- SU J, LIU Y R, MO CH W, *et al.*. Research development on preparation technologies of active layer preparation of ZnO-based thin film[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(3): 315-322. (in Chinese)
- [18] 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]. *Electronics Letters*, 1991, 27(19): 1734-1735.
- [19] WEI CH, SHI H X, LUO H Y, *et al.*. 34 nm-wavelength-tunable picosecond Ho³⁺/Pr³⁺-codoped ZBLAN fiber laser[J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19170-19178.
- [20] TANG P H, QIN ZH P, LIU J, *et al.*. Watt-level passively mode-locked Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser at 2.8 μm[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4855-4858.
- [21] NOVOSELOV K S, JIANG D, SCHEDIN F, *et al.*. Two-dimensional atomic crystals[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(30): 10451-10453.
- [22] WANG Q H, KALANTAR-ZADEH K, KIS A, *et al.*. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides[J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(11): 699-712.
- [23] CHEN Y, JIANG G B, CHEN SH Q, *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.

- [24] JIANG X T, LIU SH X, LIANG W Y, *et al.*. Broadband nonlinear photonics in few-layer MXene $Ti_3C_2T_x$ ($T = F, O, \text{ or } OH$) [J]. *Laser & Photonics Review*, 2018, 12(2): 1700229.
- [25] WANG SH X, YU H H, ZHANG H J, *et al.*. Broadband few-layer MoS_2 saturable absorbers [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(21): 3538-3544.
- [26] WANG M X, ZHANG F, WANG ZH P, *et al.*. Passively Q-switched Nd^{3+} solid-state lasers with antimonene as saturable absorber [J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 4085-4095.
- [27] GUO J, HUANG D ZH, ZHANG Y, *et al.*. 2D GeP as a novel broadband nonlinear optical material for ultrafast photonics [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13: 1900123.
- [28] MOHANRAJ J, VELMURUGAN V, SIVABALAN S. Transition metal dichalcogenides based saturable absorbers for pulsed laser technology [J]. *Optical Materials*, 2016, 60: 601-617.
- [29] TIU Z C, OOI S I, GUO J, *et al.*. Review: application of transition metal dichalcogenide in pulsed fiber laser system [J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(8): 082004.
- [30] LI H, LU G, WANG Y L, *et al.*. Mechanical exfoliation and characterization of single- and few-layer nanosheets of WSe_2 , TaS_2 , and $TaSe_2$ [J]. *Small*, 2013, 9(11): 1974-1981.
- [31] COLEMAN J N, LOTYA M, O'NEILL A, *et al.*. Two-dimensional nanosheets produced by liquid exfoliation of layered materials [J]. *Science*, 2011, 331(6017): 568-571.
- [32] MAK K F, HE K L, SHAN J, *et al.*. Control of valley polarization in monolayer MoS_2 by optical helicity [J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(8): 494-498.
- [33] BERTOLAZZI S, BRIVIO J, KIS A. Stretching and breaking of ultrathin MoS_2 [J]. *ACS Nano*, 2011, 5(12): 9703-9709.
- [34] LEE Y H, ZHANG X Q, ZHANG W J, *et al.*. Synthesis of large-area MoS_2 atomic layers with chemical vapor deposition [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(17): 2320-2325.
- [35] NAJMAEI S, LIU ZH, ZHOU W, *et al.*. Vapour phase growth and grain boundary structure of molybdenum disulphide atomic layers [J]. *Nature Materials*, 2013, 12(8): 754-759.
- [36] REN L, QI X, LIU Y D, *et al.*. Large-scale production of ultrathin topological insulator bismuth telluride nanosheets by a hydrothermal intercalation and exfoliation route [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(11): 4921-4926.
- [37] PRADO G, FOURNÈS L, DELMAS C. On the $Li_xNi_{0.70}Fe_{0.15}Co_{0.15}O_2$ system: an X-ray diffraction and mössbauer study [J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2001, 159(1): 103-112.
- [38] RAMAKRISHNA MATTE H S S, GOMATHI A, *et al.*. MoS_2 and WS_2 analogues of graphene [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2010, 49(24): 4059-4062.
- [39] FOMINSKI V Y, NEVOLIN V N, ROMANOV R I, *et al.*. Ion-assisted deposition of MoS_x films from laser-generated plume under pulsed electric field [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 89(2): 1449-1457.
- [40] CONG CH X, SHANG J ZH, WU X, *et al.*. Synthesis and optical properties of large-area single-crystalline 2D semiconductor WS_2 monolayer from chemical vapor deposition [J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, 2(2): 131-136.
- [41] REICHARDT S, WIRTZ L. *Raman Spectroscopy of Graphene* [M]. BINDER R. Optical Properties of Graphene. Singapore: World Scientific, 2017.
- [42] DRESSELHAUS M S, JORIO A, SAITO R. Characterizing graphene, graphite, and carbon nanotubes by raman spectroscopy [J]. *Annual Review of Condensed Matter Physics*, 2010, 1: 89-108.
- [43] DRESSELHAUS M S, JORIO A, HOFMAN M, *et al.*. Perspectives on carbon nanotubes and graphene raman spectroscopy [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(3): 751-758.
- [44] ZUO CH H, CAO Y P, YANG Q, *et al.*. Passively Q-switched 295- μm bulk laser based on rhenium disulfide as saturable absorber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(3): 206-209.
- [45] HUANG B, DU L, YI Q, *et al.*. Bulk-structured $PtSe_2$ for femtosecond fiber laser mode-locking [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2604-2611.
- [46] YAO Y P, LI X W, SONG R G, *et al.*. The energy band structure analysis and 2 μm Q-switched laser application of layered rhenium diselenide [J]. *RSC Advances*, 2019, 9(25): 14417-14421.
- [47] WANG J T, CHEN H, JIANG Z K, *et al.*. Mode-locked thulium-doped fiber laser with chemical vapor deposited

- molybdenum ditelluride[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 1998-2001.
- [48] WANG J T, JIANG Z K, CHEN H, *et al.*. Magnetron-sputtering deposited WTe₂ for an ultrafast thulium-doped fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(23): 5010-5013.
- [49] TIAN X L, WEI R F, LIU M, *et al.*. Ultrafast saturable absorption in TiS₂ induced by non-equilibrium electrons and the generation of a femtosecond mode-locked laser[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(20): 9608-9615.
- [50] WU K, CHEN B H, ZHANG X Y, *et al.*. High-performance mode-locked and Q-switched fiber lasers based on novel 2D materials of topological insulators, transition metal dichalcogenides and black phosphorus: review and perspective (invited)[J]. *Optics Communications*, 2018, 406: 214-229.
- [51] TIAN Z, WU K, KONG L CH, *et al.*. Mode-locked thulium fiber laser with MoS₂[J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12(6): 065104.
- [52] WEI CH, LUO H Y, ZHANG H, *et al.*. Passively Q-switched mid-infrared fluoride fiber laser around 3 μm using a tungsten disulfide (WS₂) saturable absorber[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(10): 105108.
- [53] HOU J, ZHAO G, WU Y ZH, *et al.*. Femtosecond solid-state laser based on tungsten disulfide saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2015, 23(21): 27292-27298.
- [54] 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]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26723-26737.
- [55] WU K, ZHANG X Y, WANG J, *et al.*. WS₂ as a saturable absorber for ultrafast photonic applications of mode-locked and Q-switched lasers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11453-11461.
- [56] WU K, ZHANG X Y, WANG J, *et al.*. 463-MHz fundamental mode-locked fiber laser based on few-layer MoS₂ saturable absorber[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1374-1377.
- [57] WANG Q K, CHEN Y, MIAO L L, *et al.*. Wide spectral and wavelength-tunable dissipative soliton fiber laser with topological insulator nano-sheets self-assembly films sandwiched by PMMA polymer[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7681-7693.
- [58] XING CH Y, XIE ZH J, LIANG ZH M, *et al.*. 2D nonlayered selenium nanosheets: facile synthesis, photoluminescence, and ultrafast photonics[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(24): 1700884.
- [59] YAN P G, LIN R Y, CHEN H, *et al.*. Topological insulator solution filled in photonic crystal fiber for passive mode-locked fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(3): 264-267.
- [60] YAN P G, LIU A J, CHEN Y SH, *et al.*. Passively mode-locked fiber laser by a cell-type WS₂ nanosheets saturable absorber[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 12587.
- [61] 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.
- [62] XU B, CHENG Y J, WANG Y, *et al.*. Passively Q-switched Nd: YAlO₃ nanosecond laser using MoS₂ as saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28934-28940.
- [63] TONGAY S, SAHIN H, KO C, *et al.*. Monolayer behaviour in bulk ReS₂ due to electronic and vibrational decoupling[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 3252.
- [64] CHHOWALLA M, SHIN H S, EDA G, *et al.*. The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets[J]. *Nature Chemistry*, 2013, 5(4): 263-275.
- [65] XU M SH, LIANG T, SHI M M, *et al.*. Graphene-like two-dimensional materials[J]. *Chemical Reviews*, 2013, 113(5): 3766-3798.
- [66] LIU E F, FU Y J, WANG Y J, *et al.*. Integrated digital inverters based on two-dimensional anisotropic ReS₂ field-effect transistors[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 6991.
- [67] TIAN H, CHIN M L, NAJMAEI S, *et al.*. Optoelectronic devices based on two-dimensional transition metal dichalcogenides[J]. *Nano Research*, 2016, 9(6): 1543-1560.
- [68] ZHANG E Z, JIN Y B, YUAN X, *et al.*. ReS₂-based field-effect transistors and photodetectors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(26): 4076-4082.
- [69] SU X C, ZHANG B T, WANG Y R, *et al.*. Broadband rhenium disulfide optical modulator for solid-state lasers[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(6): 498-505.

- [70] HAN SH, ZHOU SH SH, LIU X L, *et al.*. Rhenium disulfide-based passively Q-switched dual-wavelength laser at 0.95 μm and 1.06 μm in Nd: YAG[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(8): 085804.
- [71] LIN M X, PENG Q Q, HOU W, *et al.*. 1.3 μm Q-switched solid-state laser based on few-layer ReS₂ saturable absorber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 109: 90-93.
- [72] TAO L L, HUANG X W, HE J SH, *et al.*. Vertically standing PtSe₂ film: a saturable absorber for a passively mode-locked Nd: LuVO₄ laser[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(7): 750-755.
- [73] YAN B ZH, ZHANG B T, NIE H K, *et al.*. Bilayer platinum diselenide saturable absorber for 2.0 μm passively Q-switched bulk lasers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(24): 31657-31663.
- [74] LI Z Q, LI R, PANG CH, *et al.*. 8.8 GHz Q-switched mode-locked waveguide lasers modulated by PtSe₂ saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8727-8737.
- [75] WANG SH Q, HUANG H T, LIU X, *et al.*. Rhenium diselenide as the broadband saturable absorber for the nanosecond passively Q-switched thulium solid-state lasers[J]. *Optical Materials*, 2019, 88: 630-634.
- [76] XUE Y CH, LI L, ZHANG B, *et al.*. ReSe₂ passively Q-switched Nd: Y₃Al₅O₁₂ laser with near repetition rate limit of microsecond pulse output[J]. *Optics Communications*, 2019, 455: 165-170.
- [77] YAO Y P, CUI N, WANG Q G, *et al.*. Highly efficient continuous-wave and ReSe₂ Q-switched ~ 3 μm dual-wavelength Er: YAP crystal lasers[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(11): 2839-2842.
- [78] LI Z Q, DONG N N, ZHANG Y X, *et al.*. Invited Article: mode-locked waveguide lasers modulated by rhenium diselenide as a new saturable absorber[J]. *APL Photonics*, 2018, 3(8): 080802.
- [79] LI CH, LENG Y X, HUO J J. Diode-pumped solid-state Q-switched laser with rhenium diselenide as saturable absorber[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(10): 1753.
- [80] YAN ZH Y, LI T, ZHAO SH ZH, *et al.*. MoTe₂ saturable absorber for passively Q-switched Ho, Pr: LiLuF₄ laser at ~ 3 μm [J]. *Optics and Laser Technology*, 2018, 100: 261-264.
- [81] LI Y H, XU Y F, XU G Y, *et al.*. Performance of an Yb: LaCa₄O(BO₃)₃ crystal laser at 1.03 \sim 1.04 μm passively Q-switched with 2D MoTe₂ saturable absorber[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 99: 167-171.
- [82] ZHANG Y ZH, WANG J W, GUAN X F, *et al.*. MoTe₂-based broadband wavelength tunable eye-safe pulsed laser source at 1.9 μm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(21): 1890-1893.
- [83] LIANG Y Y, ZHAO J, QIAO W CH, *et al.*. Passively Q-switched Er: YAG laser at 1645 nm utilizing a multilayer molybdenum ditelluride (MoTe₂) saturable absorber[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(9): 095801.
- [84] YAN B ZH, ZHANG B T, NIE H K, *et al.*. High-power passively Q-switched 2.0 μm all-solid-state laser based on a MoTe₂ saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2018, 26(14): 18505-18512.
- [85] MA Y J, TIAN K, DOU X D, *et al.*. Passive Q-switching induced by few-layer MoTe₂ in an Yb: YCOB microchip laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 25147-25155.
- [86] TIAN K, LI Y H, YANG J N, *et al.*. Passively Q-switched Yb: KLu(WO₄)₂ laser with 2D MoTe₂ acting as saturable absorber[J]. *Applied Physics B*, 2019, 125(2): 24.
- [87] CHEN L J, LI X, ZHANG H K, *et al.*. Passively Q-switched 1.989 μm all-solid-state laser based on a WTe₂ saturable absorber[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(35): 10239-10242.
- [88] YAN ZH Y, LI T, ZHAO J, *et al.*. Tungsten ditelluride for a nanosecond Ho, Pr: LiLuF₄ laser at 2.95 μm [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(4): 045801.
- [89] LI G Q, WU CH, YAN ZH Y, *et al.*. TiS₂ as a novel saturable absorber for a 1645 nm passively Q-switched laser[J]. *Laser Physics*, 2019, 29(5): 055801.
- [90] WOODWARD R I, KELLEHER E J R, HOWE R C T, *et al.*. Tunable Q-switched fiber laser based on saturable edge-state absorption in few-layer Molybdenum disulfide (MoS₂)[J]. *Optics Express*, 2014, 22(25): 31113-31122.
- [91] CUI Y D, LU F F, LIU X M. Nonlinear saturable and polarization-induced absorption of rhenium disulfide[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 40080.
- [92] MAO D, CUI X Q, GAN X T, *et al.*. Passively Q-switched and mode-locked fiber laser based on an ReS₂ saturable absorber[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 1100406.
- [93] LU F F. Passively harmonic mode-locked fiber laser based on ReS₂ saturable absorber[J]. *Modern Physics Letters B*,

- 2017, 31(18): 1750206.
- [94] ZHAO R W, LI G R, ZHANG B T, *et al.*. Multi-wavelength bright-dark pulse pair fiber laser based on rhenium disulfide[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5819-5826.
- [95] LU B L, WEN Z R, HUANG K X, *et al.*. Passively Q-switched Yb³⁺-doped fiber laser with ReS₂ Saturable absorber[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(4): 1600104.
- [96] YUAN J, MU H R, LI L, *et al.*. Few-layer platinum diselenide as a new saturable absorber for ultrafast fiber lasers[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(25): 21534-21540.
- [97] ZHANG K, FENG M, REN Y Y, *et al.*. Q-switched and mode-locked Er-doped fiber laser using PtSe₂ as a saturable absorber[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(9): 893-899.
- [98] LI Y H, LOU Y J, HE J S, *et al.*. Q-switched ytterbium fiber laser based on rhenium diselenide as a saturable absorber[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52(46): 465101.
- [99] LEE J, LEE K, KWON S, *et al.*. Investigation of nonlinear optical properties of rhenium diselenide and its application as a femtosecond mode-locker[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(9): 984-993.
- [100] DU L, JIANG G B, MIAO L L, *et al.*. Few-layer rhenium diselenide: an ambient-stable nonlinear optical modulator[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(4): 926-935.
- [101] WANG G M. Wavelength-switchable passively mode-locked fiber laser with mechanically exfoliated molybdenum ditelluride on side-polished fiber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 96: 307-312.
- [102] LIU M L, LIU W J, WEI ZH Y. MoTe₂ saturable absorber with high modulation depth for erbium-doped fiber laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(13): 3100-3105.
- [103] LIU M L, LIU W J, YAN P G, *et al.*. High-power MoTe₂-based passively Q-switched erbium-doped fiber laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(2): 020007.
- [104] WANG J T, JIANG Z K, CHEN H, *et al.*. High energy soliton pulse generation by a magnetron -sputtering- deposition -grown MoTe₂ saturable absorber[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(6): 535-541.
- [105] KO S, LEE J, LEE J H. Passively Q-switched ytterbium-doped fiber laser using the evanescent field interaction with bulk-like WTe₂ particles[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(2): 020017.
- [106] LIU M L, OUYANG Y Y, HOU H R, *et al.*. Q-switched fiber laser operating at 1.5 μm based on WTe₂[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(2): 020006.
- [107] ZHU X, CHEN S, ZHANG M, *et al.*. TiS₂-based saturable absorber for ultrafast fiber lasers[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(10): C44-C48.

作者简介:



孙俊杰 (1994—), 女, 吉林长春人, 硕士, 研究实习员, 2015年于武汉大学获得学士学位, 2017年于国防科技大学获得硕士学位, 主要从事新型激光技术方面的研究。E-mail: 15143115236@163.com



陈飞 (1982—), 男, 河南南阳人, 博士, 研究员, 博士生导师, 2005年于长春理工大学获得学士学位, 2007年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 2011年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: feichenny@126.com