



MnPS₃可饱和吸收体被动锁模掺铒光纤激光器双波长激光

俞强 郭琨 陈捷 王涛 汪进 史鑫尧 吴坚 张凯 周朴

Dual-wavelength self-starting mode-locking Er-doped fiber laser with MnPS₃ saturable absorber

Yu Qiang Guo Kun Chen Jie Wang Tao Wang Jin Shi Xin-Yao Wu Jian Zhang Kai Zhou Pu

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 69, 184208 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200342

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200342>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于WS2可饱和吸收体的调Q锁模Tm, Ho: LLF激光器

Passively Q-switched mode-locked Tm, Ho:LLF laser with a WS2 saturable absorber

物理学报. 2017, 66(11): 114207 <https://doi.org/10.7498/aps.66.114207>

基于石墨烯可饱和吸收体的纳秒锁模掺铒光纤激光器

Nanosecond mode-locked Tm-doped fiber laser based on graphene saturable absorber

物理学报. 2017, 66(11): 114209 <https://doi.org/10.7498/aps.66.114209>

基于铋可饱和吸收体的超快激光产生

Generation of ultra-fast pulse based on bismuth saturable absorber

物理学报. 2020, 69(9): 094203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191995>

基于增益光纤长度优化的双波长运转掺铒光纤锁模激光器

Dual-wavelength mode-locked Er-doped fiber laser based on optimizing gain fiber length

物理学报. 2017, 66(13): 134203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.134203>

高功率全光纤1.6微米类噪声方形脉冲激光器

High-power 1.6 μ m noise-like square pulse generation in an all-fiber mode-locked laser

物理学报. 2020, 69(16): 164202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200245>

滤波对8字腔掺铒光纤激光器锁模运转的影响

Influence of spectral filtering on mode-locking operation of figure-eight Er-doped fiber laser

物理学报. 2019, 68(6): 064206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182144>

专题: 低维材料非线性光学与器件

MnPS₃ 可饱和吸收体被动锁模掺铒光纤激光器双波长激光*

俞强^{1)2)#} 郭琨^{2)#} 陈捷¹⁾ 王涛²⁾ 汪进²⁾
史鑫尧¹⁾ 吴坚^{2)†} 张凯^{1)‡} 周朴²⁾

1) (中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 国际实验室, 苏州 215123)

2) (国防科技大学前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

(2020 年 3 月 6 日收到; 2020 年 3 月 29 日收到修改稿)

过渡金属硫代亚磷酸盐 MnPS₃ 是三元含磷二维材料, 具有新颖的光电特性. 采用化学气相传输方法生长 MnPS₃ 单晶, 结合机械剥离方法制备可饱和吸收体光纤调制器件. 以 MnPS₃ 可饱和吸收体构建掺铒光纤环形激光器, 实现脉冲间隔为 196.1 ns, 脉冲宽度为 3.8 ns, 最高输出功率为 27.2 mW, 1565.19 nm 和 1565.63 nm 双波长锁模脉冲激光输出, 实现 280 h 以上高稳定自启动双波长锁模输出.

关键词: MnPS₃, 可饱和吸收, 锁模**PACS:** 42.55.Wd, 42.60.Fc, 81.07.Bc**DOI:** 10.7498/aps.69.20200342

1 引言

脉冲光纤激光在工业加工、生物成像、医学检测、现代通信等领域需求广泛, 一直受到国内外广泛关注^[1–3]. 自从 2010 年石墨烯可饱和吸收 (saturable absorber, SA) 调制器件用于掺铒光纤环形腔, 产生了 1.5 μm 的脉冲激光以来^[4,5], 二维材料因其制备简便、非线性吸收可控、带隙可调, 已广泛应用于光纤脉冲激光产生^[6–10]. 二维材料中, 含磷材料是重要成员, 含磷一元二维材料黑磷、二元二维材料砷磷等已广泛应用到半导体行业, 并作为可饱和吸收体在不同波长上获得了不同类型的脉冲激光^[11–14]. 相比于一元和二元的含磷二维材料, 三元的过渡金属硫代亚磷酸盐 (MPS₃) 二维材料化学

多样性高和结构复杂, 表现出新颖的电、光和磁特性^[15–17]. 作为含磷家族成员, MPS₃ 不仅具备黑磷优异的工作性能, 还解决了稳定性难题, 能充分发挥磷元素电子施主、化学亲和力、高晶格匹配能力等优势, 且随着过渡金属 *M* 的变化, MPS₃ 拥有丰富的光学带隙, 广泛应用于低维材料非线性光学和器件^[17–21].

作为二维层状结构低维材料, MPS₃ 由三种元素组成^[15,22], 其中过渡金属元素 *M* 主要为 Fe, Mn, Ni, Zn, Cd, V 等. MnPS₃ 作为典型的 MPS₃: 1) 具有层状单斜晶体结构, 每个晶胞中含有 2 个 Mn²⁺ 离子, 1 个 P₂S₆^{4–} 基团, 为六方晶格; 2) 各向异性, 且层间有较强的磁相互作用; 3) 拥有中等的半导体带隙, 在光电探测、二维磁性、光催化等领域应用广泛, 是当前 MPS₃ 家族的研究热点之一^[23,24].

* 国家自然科学基金 (批准号: 61922082, 61875223, 61801472) 和湖南省自然科学基金 (批准号: 2018JJ3610) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: wujian15@nudt.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: kzhang2015@sinano.ac.cn

20 世纪 80 年代, MnPS_3 的材料结构和磁性首次报道后, MnPS_3 在光催化、磁性已开展许多研究工作 [19,25–27]. 关于 MnPS_3 低维尺度如少层纳米片的研究还处于起步阶段, 特别是 MnPS_3 可饱和吸收特性较少应用到脉冲激光产生, 目前还没有 MnPS_3 纳米片作为可饱和吸收体产生锁模脉冲的报道.

本文采用化学气相传输方法制备 MnPS_3 单晶, 并优化机械剥离方法, 制备 MnPS_3 可饱和吸收体 ($\text{MnPS}_3\text{-SA}$) 光纤调制器件. 以 $\text{MnPS}_3\text{-SA}$ 为调制器件, 掺铒光纤为增益光纤, 实现稳定的自启动双波长锁模输出, 实现双波长输出对激光器的实际应用有重要意义 [28].

2 MnPS_3 可饱和吸收体的制备和表征

与黑磷的制备方法类似, 使用化学气相传输法生长三元含磷二维材料 MnPS_3 单晶 [17,29], 但区别在于矿化剂和输运剂的选择, 化学气相传输法原理跟化学气相沉积类似, 不同于一般化学气相沉积方法有裂解反应物过程, 化学气相传输方法则是把粉末原料蒸发后跟随载气沉积在低温区的衬底. 实验使用的纯锰粉 (Mn , 99.99%)、红磷 (RP , 99.999%)、硫 (S , 99.99%) 和碘 (I_2 , 1 mg/mL) 按照特定比例混合均匀并称重 2 g 作为反应物 (均购

于 Sigma-Aldrich 公司), 以适量的碘作为输运剂, 放置于尖头石英安瓿内, 并在 1×10^{-3} Pa 的真空条件下真空封管. 放置在双温区管式炉中的石英安瓿, 处于 700 °C/650 °C 的双区温度梯度环境中, 在 I_2 和温度梯度的共同作用下通过输运作用在石英管冷端获得干净的厘米级绿色六角形态片状 MnPS_3 单晶 (如图 1(a) 和图 1(b) 所示).

可饱和吸收体的制备方法目前主要有三明治型、倏逝波型、可饱和吸收镜型等 [30–32]. 使用优化的胶带法机械剥离 MnPS_3 单晶, 而后转移到光纤跳线端帽上, 制备光纤脉冲激光所需的类三明治结构 $\text{MnPS}_3\text{-SA}$ 调制器件. 采用同样的机械剥离方法, 将 $\text{MnPS}_3\text{-SA}$ 转移到特制 Si 衬底上 (表面有 285 nm SiO_2) 表征. 图 1(c) 给出了使用共聚焦激光拉曼光谱仪 (Raman, LabRAM HR Evolution) 测得的 $\text{MnPS}_3\text{-SA}$ 拉曼光谱, 155, 225, 274 和 568 cm^{-1} 处的拉曼峰对应 E_g 振动模式, 在 246, 384 和 582 cm^{-1} 处观察到 A_g^1 振动模式, 与之前报道 MnPS_3 典型特征峰相符 [33,18].

图 2 为使用 Quanta 400 FEG 场发射扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 测得的 $\text{MnPS}_3\text{-SA}$ 微观结构. 图 2(a) 为 $\text{MnPS}_3\text{-SA}$ 的场发射电子显微镜形貌图像, 图像显示样品表面没有杂质、光滑平整, 样品具有 MnPS_3 低维材料特有的六边形和层状形貌. 利用 SEM 配套的

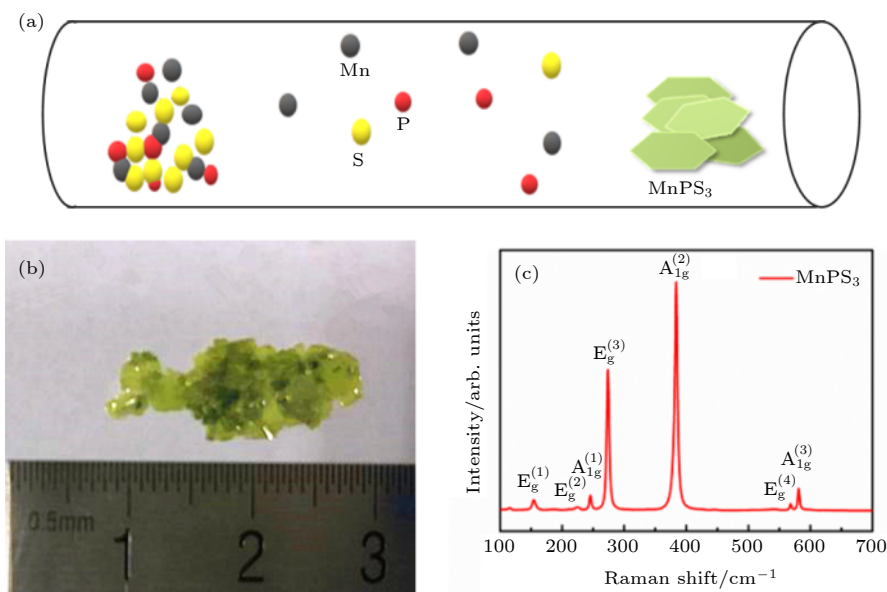


图 1 MnPS_3 晶体生长及表征 (a) 化学气相传输法制备 MnPS_3 晶体的工艺流程示意图; (b) MnPS_3 单晶的照片; (c) MnPS_3 单晶的拉曼光谱

Fig. 1. Characteristics of MnPS_3 crystals: (a) Chemical vapor transport method; (b) picture of MnPS_3 ; (c) Raman spectrum for MnPS_3 .

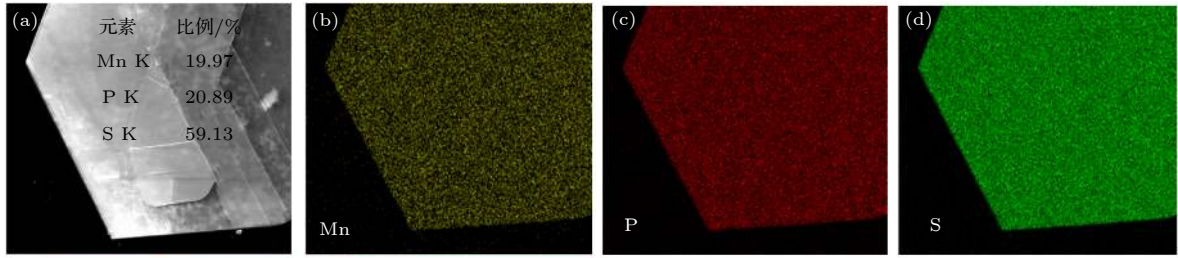


图 2 MnPS_3 -SA 的 SEM 表征 (a) 随机选取的样品 SEM 图像和元素分析表; (b)–(d) Mn, P 和 S 的 EDX 元素面扫描
Fig. 2. SEM characteristics of MnPS_3 -SA: (a) SEM image of a randomly selected MnPS_3 flake, and elemental analysis of this sample; (b)–(d) EDX element mappings for Mn, P, and S.

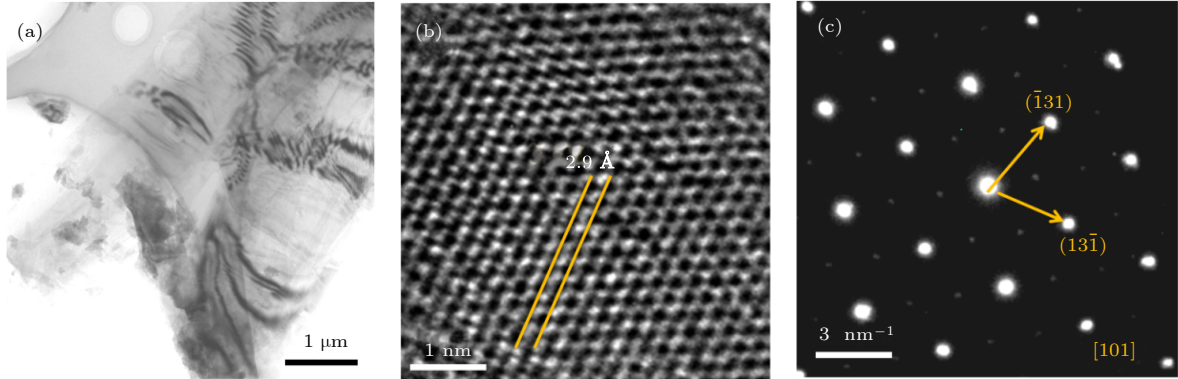


图 3 MnPS_3 纳米片的 TEM 表征 (a) MnPS_3 纳米片形貌; (b) MnPS_3 纳米片的 HRTEM 像; (c) SAED 图
Fig. 3. TEM characterization of MnPS_3 nanosheets: (a) TEM image of a MnPS_3 nanosheet on a copper grid; (b) the HRTEM image of the MnPS_3 nanosheet; (c) the corresponding SAED showing its single crystal nature.

能量散射 X 射线 (energy dispersive X-ray spectroscopy, EDX) 表征 MnPS_3 选定区域的元素成分和原子含量, 并做元素面扫描, EDX 能谱分析得到 Mn 原子、P 原子和 S 原子在均匀分布且原子比为 19.97%, 20.89% 和 59.13% (约 1:1:3), 满足化学式比例 (如图 2 所示).

采用透射电子显微镜 (transmission electron microscope, TEM) 表征 MnPS_3 样品的晶体结构, 结果如图 3 所示. MnPS_3 透射样品如图 3(a) 所示. 图 3(b) 和图 3(c) 分别展示了高分辨率透射电子显微镜 (high-resolution transmission electron microscope, HRTEM) 图像和区域电子衍射 (selected area electron diffraction, SAED) 图, 图示平面距离为 0.29 nm 的清晰晶格条纹对应于 $(13\bar{1})$ 晶面. 这些表征, 证明了本方法制备 MnPS_3 样品结构均一、组分准确.

3 光纤激光器环形腔结构

将 MnPS_3 -SA 调制器件接入光纤环形腔构建如图 4 所示实验装置: 环形腔使用 976 nm 稳

波长激光二极管 (laser diode, LD) 作为抽运源, 并通过 980/1550 波分复用器 (wavelength division multiplexing, WDM) 接入环形腔; 增益介质使用 3.2 m 长的掺铒光纤 (6/125); 为了保证环形腔中能量单向传输, 在掺铒光纤后端接入偏振无关隔离器 (polarization independent isolator, PI-ISO); 为了管理腔内色散, 在 PI-ISO 后连接了约 20 m 长的单模光纤 (SMF-28); 采用偏振控制器 (polarization controller, PC) 对偏振态进行调节; 采用 20:80 的光耦合器 (optical coupler, OC) 从激光腔中耦合出 20% 的腔内能量. 光纤环形腔的总长度

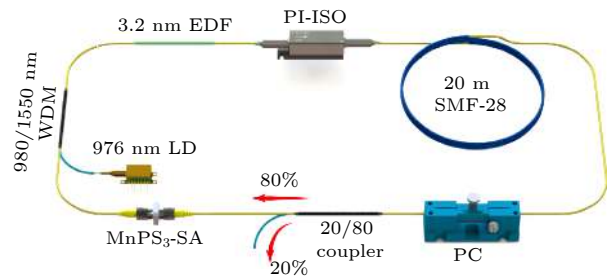


图 4 MnPS_3 -SA 掺铒光纤激光器的实验装置
Fig. 4. Experimental setup of the erbium-doped fiber laser.

约为 35 mW, 在耦合器的输出端, 使用 2 GHz 的光电探头将光信号转化为电信号, 并使用 1 GHz 的带射频分析功能示波器记录输出激光的时域和频域特性; 利用最高分辨率 0.02 nm 的精密光谱仪记录输出激光的光谱; 使用毫瓦功率计记录激光功率.

基于光纤环形腔实验装置, 随着抽运光功率增加, 当输入抽运功率增加到 70 mW 时, 在示波器

上观测到激光输出的脉冲时域型号信号, 并在 70—270 mW 的抽运范围内连续变化时可以观测到被动锁模激光输出. 输出激光功率和抽运功率的关系如图 5(a) 所示, 输出功率随抽运光功率的增加而线性增加, 最大输出功率为 27.2 mW.

利用高精度光谱仪记录输出激光的光谱, 显示输出脉冲激光为双波长. 记录抽运功率为 180 mW 时典型输出光谱如图 5(b) 所示, 两个波长峰值分

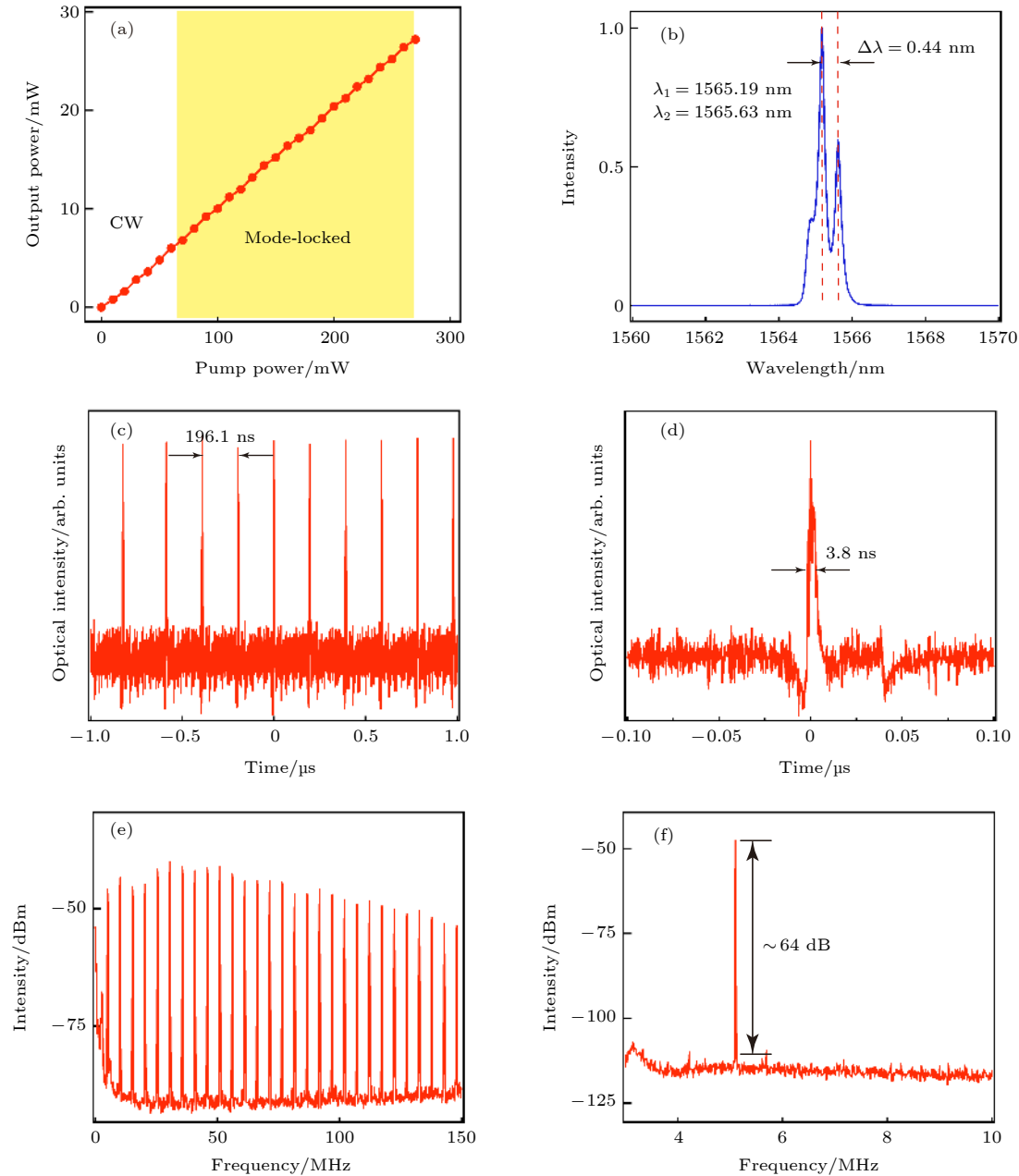


图 5 基于 MnPS₃-SA 的脉冲光纤激光器的性能 (a) 输出功率与抽运功率的关系; (b) 输出光谱; (c) 脉冲序列; (d) 脉冲脉宽; (e) 0—10 MHz 射频信号; (f) 射频基频信号

Fig. 5. Performances of the pulse fiber laser based on MnPS₃-SA: (a) The output power versus the pump power; (b) output optical spectrum; (c) the pulse trace; (d) the duration of single pulse; (e) the radio frequency spectrum from 0–10 MHz; (f) the radio frequency spectrum with ~ 64 dB (inset).

别为 1565.19 nm 和 1565.63 nm, 双波长间隔为 0.44 nm. 光谱展宽不明显, 且没有克利边带. 同时记录此抽运功率下激光器输出激光的时域特性如图 5(c) 和图 5(d) 所示, 输出锁模脉冲脉冲间隔为 196.1 ns (图 5(c)), 脉冲宽度为 3.8 ns (图 5(d)). 利用示波器的频谱分析功能分析脉冲激光的频谱特性如图 5(e) 和图 5(f) 所示, 图 5(e) 为射频基频信号, 输出脉冲射频信号基频信噪比超过 64 dB, 显示脉冲具有较高的稳定性.

在相同条件下记录抽运功率为 70, 120, 170, 220 和 270 mW 时激光器输出光谱和功率. 图 6(a) 给出了不同抽运功率下激光器的发射光谱, 双波长稳定在 1565.18 nm (± 0.01 nm) 和 1565.64 nm (± 0.02 nm), 双波长间隔 0.46 nm (± 0.02 nm), 如图 6(b) 所示. 记录不同抽运功率下脉冲激光的重复频率 (图 6(c)), 输出频率稳定在 5.109 MHz (± 0.011 MHz). 随抽运功率的增加, 长波长强度呈非线性减弱, 双波长效果逐渐减弱, 在 270 mW 抽运功率下, 下降到第一个峰值的 29.7%. 因为抽运功率的增加会导致线性增益的增加, 使得腔内模式更容易达到可饱和吸收体的吸收光强. 因此双波长锁模输出需要在 70—270 mW 功率区间内实现, 且功率越低, 双波长效果越好. 此双波长光纤脉冲激光在不同抽运功率下发射激光具有稳定的输出

波长和重复频率.

实验过程中为了测试被动锁模激光输出的长时间稳定性, 在相同的环境条件下, 使用相同测试方法记录第 1, 7, 8, 11, 12 天光纤激光器在抽运功率为 180 mW 时的出光特性. 实验显示, 光纤激光正当其可以实现自启动锁模, 输出激光的波长和输出功率特性如图 7 所示. 从图 7(a) 可看出, 输出光谱的 2 个输出波长稳定在 1565.19 nm (± 0.01 nm) 和 1565.58 nm (± 0.03 nm), 双波长间隔 0.39 nm (± 0.04 nm), 输出功率为 16.67 mW (± 0.10 mW, $\pm 0.6\%$). 实验数据证实该激光器长时间工作时, 发射波长、波长间隔和频率均保持高稳定性. 分析误差增大的主要原因是谐振腔在实验环境变化 (温度、振动等) 的影响下, 等价腔长可能发生漂移以及温度导致折射率的微小变化.

实验中为验证光纤环形腔是否有类似的可饱和吸收特性, 将 MnPS_3 可饱和吸收体从腔内移除, 改变抽运功率和调节偏振控制器都没有观察到脉冲和双波长现象, 验证 MnPS_3 是产生双波长锁模的惟一因素. 同时, 去除 MnPS_3 可饱和吸收体后, 激光器输出为较好的单波长光纤激光.

MnPS_3 作为一种可饱和吸收材料, 插入在谐振腔中可被动地周期性调制谐振腔的内部吸收损耗, 来实现激光器的锁模运转, 其具体作用机理是:

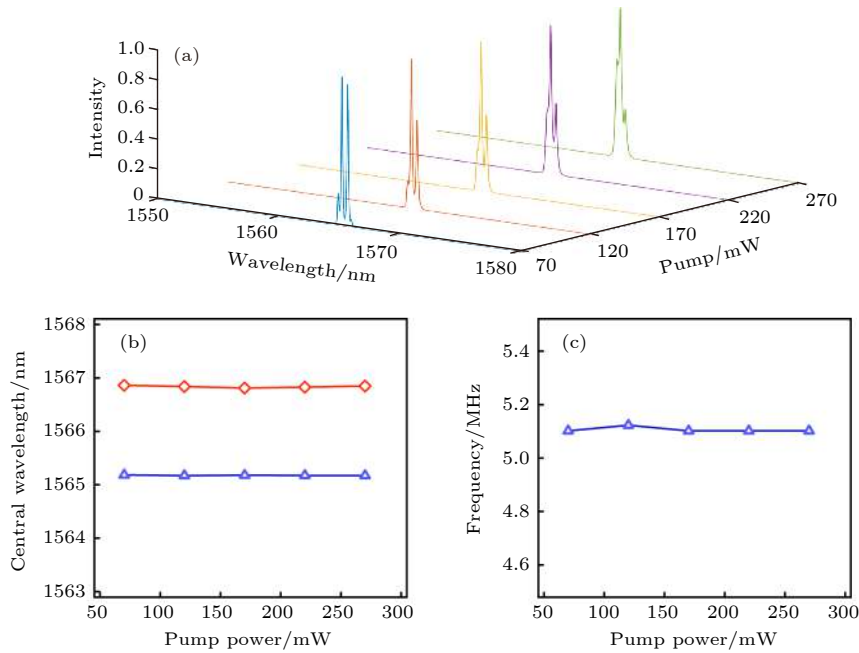


图 6 基于 MnPS_3 -SA 的脉冲光纤激光器在 70, 120, 170, 220 和 270 mW 抽运功率下的 (a) 光谱、(b) 波长和 (c) 频率特性

Fig. 6. Performances of the pulse fiber laser based on MnPS_3 -SA with the pump power at 70, 120, 170, 220, and 270 mW pump power: (a) Spectrum; (b) wavelength; (c) frequency.

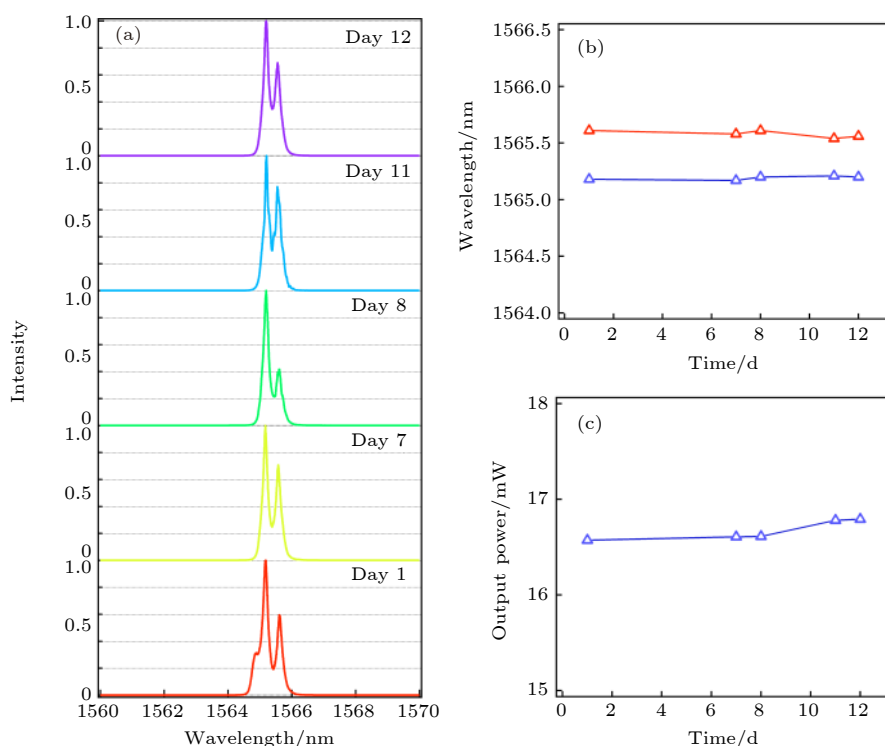


图 7 基于 $\text{MnPS}_3\text{-SA}$ 的脉冲激光长时间工作稳定性 (a) 第 1, 7, 8, 11, 12 天的输出光谱; (b) 中心波长; (c) 输出功率

Fig. 7. Output spectrum of the EDFL based on $\text{MnPS}_3\text{-SA}$: (a) Output spectrum recorded on 1st, 7th, 8th, 11th, 12th day; (b) wavelength peak position; (c) output power.

初始激光脉冲包含了所有模式, 彼此之间相位无规则分布, 此时输出光强随机, 未实现锁模. MnPS_3 的吸收特性导致对特定波长的吸收弱. 光强大于可饱和吸收光强时脉冲被吸收, 在增益介质的线性放大下, 对强脉冲的吸收弱, 对弱脉冲吸收强, 弱脉被抑制, 强脉冲高速增长, 最终得到双波长的锁模输出.

4 结 论

本文采用化学气相传输方法制备了 MnPS_3 单晶, 并利用优化胶带法机械剥离制备光纤脉冲激光所需的 $\text{MnPS}_3\text{-SA}$ 调制器件, 并对其进行材料表征和分析, $\text{MnPS}_3\text{-SA}$ 调制器件光纤激光振荡器实现了稳定的全光纤被动锁模激光自启动输出. 基于该环形腔, 可实现最大输出功率为 27.2 mW, 双波长稳定在 1565.18 nm (± 0.01 nm) 和 1565.64 nm (± 0.02 nm), 双波长间隔 0.46 nm (± 0.02 nm), 基频信噪比约为 64 dB, 频率为 5.109 MHz (± 0.011 MHz) 的脉冲输出. 此外, $\text{MnPS}_3\text{-SA}$ 光纤激光振荡器可实现 280 h 以上稳定自启动锁模, 输出双波长稳定在 1565.19 nm (± 0.01 nm) 和 1565.58 nm

(± 0.03 nm), 双峰间隔 0.39 nm (± 0.04 nm), 输出的功率为 16.67 mW (± 0.10 mW, $\pm 0.6\%$). 实验表明, 二维材料 MnPS_3 作为可饱和吸收体, 可以提供一种新型方法实现低成本、稳定性好的双波长的锁模脉冲输出, 在光纤通信、工业加工、医疗器械等领域都有潜在的应用价值.

参考文献

- [1] Penilla E H, Devia Cruz L F, Wieg A T, Martinez Torres P, Cuando Espitia N, Sellappan P, Kadera Y, Aguilar G, Garay J E 2019 *Science* **365** 803
- [2] Fermann M E, Hartl I 2013 *Nat. Photonics* **7** 868
- [3] Wang C, Liu J, Zhang H 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 188101 (in Chinese) [王聪, 刘杰, 张晗 2019 *物理学报* **68** 188101]
- [4] Zhang H, Tang D, Knize R J, Zhao L, Bao Q, Loh K P 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 111112
- [5] Sun Z, Hasan T, Torrisi F, Popa D, Privitera G, Wang F, Bonaccorso F, Basko D M, Ferrari A C 2010 *ACS nano* **4** 803
- [6] Tan C, Cao X, Wu X J, He Q, Yang J, Zhang X, Chen J, Zhao W, Han S, Nam G H, Sindoro M, Zhang H 2017 *Chem. Rev.* **117** 6225
- [7] Wu H S, Song J, Wu J, Xu J, Xiao H, Leng J, Zhou P 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **24** 0901206
- [8] Hong S, Ledee F, Park J, Song S, Lee H, Lee Y S, Kim B, Yeom D I, Deleporte E, Oh K 2018 *Laser Photonics Rev.* **12** 1800118
- [9] Huang S S, Wang Y G, Li H Q, Lin R Y, Yan P G 2014 *Acta*

- Phys. Sin.* **63** 084202 (in Chinese) [黄诗盛, 王勇刚, 李会权, 林荣勇, 闫培光 2014 物理学报 **63** 084202]
- [10] Liu X, Li X, Tang Y, Zhang S 2020 *Opt. Lett.* **45** 161
- [11] Ahmad H, Salim M A M, Thambiratnam K, Norizan S F, Harun S W 2016 *Laser Phys. Lett.* **13** 095103
- [12] Hisyam M B, Rusdi M F M, Latiff A A, Harun S W 2017 *Ieee J. Sel. Top. Quant.* **23** 39
- [13] Wang T, Jin X, Yang J, Wu J, Yu Q, Pan Z, Shi X, Xu Y, Wu H, Wang J, He T, Zhang K, Zhou P 2019 *ACS Appl. Mater. Inter.* **11** 36854
- [14] Wang T, Shi X, Wang J, Xu Y, Chen J, Dong Z, Jiang M, Ma P, Su R, Ma Y, Wu J, Zhang K, Zhou P 2019 *Sci. China Inf. Sci.* **62** 220406
- [15] Liu J, Li X B, Wang D, Lau W M, Peng P, Liu L M 2014 *J. Chem. Phys.* **140** 054707
- [16] Liu J, Zhao F, Wang H, Zhang W, Hu X, Li X, Wang Y 2019 *Opt. Mater.* **89** 100
- [17] Shi X Y 2019 *M. S. Thesis* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [史鑫尧 2019 硕士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [18] Hou X, Zhang X, Ma Q, Tang X, Hao Q, Cheng Y, Qiu T 2020 *Adv. Funct. Mater.* **30** 1910171
- [19] Gusmão R, Sofer Z, Pumera M 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1805975
- [20] Yin Q, Wang J, Shi X Y, Wang T, Yang J, Zhao X X, Shen Z J, Wu J, Zhang K, Zhou P, Jiang Z F 2019 *Chin. Phys. B* **28** 084208
- [21] Liu J, Li X, Xu Y, Ge Y, Wang Y, Zhang F, Wang Y, Fang Y, Yang F, Wang C, Song Y, Xu S, Fan D, Zhang H 2019 *Nanoscale* **11** 14383
- [22] Du K Z, Wang X Z, Liu Y, Hu P, Utama M I B, Gan C K, Xiong Q, Kloc C 2016 *ACS Nano* **10** 1738
- [23] Cheng Z, Shifa T A, Wang F, Gao Y, He P, Zhang K, Jiang C, Liu Q, He J 2018 *Adv. Mater.* **30** 1707433
- [24] Lee J U, Lee S, Ryoo J H, Kang S, Kim T Y, Kim P, Park C H, Park J G, Cheong H 2016 *Nano Lett.* **16** 7433
- [25] Kumar R, Jenjeti R N, Austeria M P, Sampath S 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 324
- [26] Kargar F, Coleman E A, Ghosh S, Lee J, Gomez M J, Liu Y, Magana A S, Barani Z, Mohammadzadeh A, Debnath B, Wilson R B, Lake R K, Balandin A A 2020 *ACS Nano* **14** 2424
- [27] Kinyanjui M K, Koester J, Boucher F, Wildes A, Kaiser U 2018 *Phys. Rev. B* **98** 035417
- [28] Qiu X L, Wang S S, Zhang X J, Zhu R J, Zhang P, Guo Y H Y, Song Y R 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 114204 (in Chinese) [邱小浪, 王爽爽, 张晓健, 朱仁江, 张鹏, 郭于鹤洋, 宋晏蓉 2019 物理学报 **68** 114204]
- [29] Shi X, Wang T, Wang J, Xu Y, Yang Z, Yu Q, Wu J, Zhang K, Zhou P 2019 *Opt. Mater. Express* **9** 2348
- [30] Yang J, Hu J, Luo H, Li J, Liu J, Li X, Liu Y 2020 *Photon. Res.* **8** 70
- [31] Wu X, Zhou Z W, Yin J D, Zhang M, Zhou L L, Na Q X, Wang J T, Yu Y, Yang J B, Chi R H, Yan P G 2020 *Nanotechnology* **31** 245204
- [32] Guo C, Wei J, Yan P, Luo R, Ruan S, Wang J, Guo B, Hua P, Lue Q 2020 *Appl. Phys. Express* **13** 012013
- [33] Wang Y M, Zhang J F, Li C H, Ma X L, Ji J T, Jin F, Lei H C, Liu K, Zhang W L, Zhang Q M 2019 *Chin. Phys. B* **28** 056301

SPECIAL TOPIC—Nonlinear optics and devices of low-dimensional materials

Dual-wavelength self-starting mode-locking Er-doped fiber laser with MnPS₃ saturable absorber^{*}

Yu Qiang^{1)2)#} Guo Kun^{2)#} Chen Jie¹⁾ Wang Tao²⁾ Wang Jin²⁾
Shi Xin-Yao¹⁾ Wu Jian^{2)†} Zhang Kai^{1)‡} Zhou Pu²⁾

1) (*i-lab, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China*)

2) (*College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

(Received 6 March 2020; revised manuscript received 29 March 2020)

Abstract

As a member of the metal phosphorus trichalcogenide family, MPS₃ is widely used in nonlinear optics and devices, which can be regarded as a significant benefit for the excellent photonic and optoelectronic properties. In this work, the MnPS₃ nanosheet is prepared by the chemical vapor transport method and the MnPS₃ saturable absorber is demonstrated by modifying mechanical exfoliation. To the best of our knowledge, the dual-wavelength self-starting mode-locking erbium-doped fiber laser with MnPS₃ saturable absorber is demonstrated for the first time. The dual wavelength mode-locked laser with a pulse repetition rate of 5.102 MHz at 1565.19 nm and 1565.63 nm is proposed. Its maximum output power at the dual-wavelength is 27.2 mW. The mode-locked laser can self-start and stably run for more than 280 h.

Keywords: MnPS₃ nanosheets, saturable absorber, mode-locking

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Fc, 81.07.Bc

DOI: 10.7498/aps.69.20200342

^{*} Project supported by the the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61922082, 61875223, 61801472) and the Natural Science Foundation of Hunan Province, China (Grant No. 2018JJ3610).

[#] These authors contributed equally.

[†] Corresponding author. E-mail: wujian15@nudt.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: kzhang2015@sinano.ac.cn