

本文引用格式:赵子霆,陈丰,韩克桢. 基于 ReSe_2 可饱和吸收体的基频和高次谐波掺铒光纤激光器[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2025, 38(2): 190-196.

Citation format: ZHAO Ziting, CHEN Feng, HAN Kezhen. Fundamental and high-harmonic erbium-doped fiber lasers based on ReSe_2 saturable absorbers[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2025, 38(2): 190-196.

文章编号 1672-6634(2025)02-0190-07

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2024100009

基于 ReSe_2 可饱和吸收体的基频和高次谐波 掺铒光纤激光器

赵子霆, 陈丰, 韩克桢

(山东理工大学 物理与光电工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要 二维材料作为可饱和吸收体在光纤激光器领域的应用引起了人们极大的兴趣。过渡金属硫化物(TMDs)作为二维材料中的一类,因其较好的光电特性和环境稳定性已经被广泛用于超快光纤激光器中。二硒化铼(ReSe_2)作为 TMDs 中的一种,通过一系列表征手法预测其具有良好的非线性光学效应。本实验通过液相剥离法制备 ReSe_2 纳米片溶液,并与聚乙烯醇(PVA)溶液混合后制成 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的膜片贴在光纤跳线头的端面形成可饱和吸收体。该膜片的调制深度和饱和强度分别为 8.8% 和 4.9 MW/cm^2 。将该可饱和吸收体集成进光纤腔中,在泵浦功率为 143.6 mW 、色散为 -0.682 ps^2 时,获得了稳定的传统孤子。进一步调整偏振态和泵浦功率,获得 38 阶稳定的谐波锁模运转。实验结果表明 ReSe_2 具有良好的脉冲调制能力,在掺铒光纤激光器领域有一定的应用价值。

关键词 二硒化铼;过渡金属硫化物;传统孤子;高阶锁模

中图分类号 TN248

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Fundamental and High-Harmonic Erbium-Doped Fiber Lasers Based on ReSe_2 Saturable Absorbers

ZHAO Ziting, CHEN Feng, HAN Kezhen

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract The application of two-dimensional(2D)materials as saturable absorbers (SA) in fiber lasers has attracted great interest. Transition metal disulfide compounds (TMDs), as a class of 2D materials, have been widely used in ultrafast fiber lasers due to their better optoelectronic properties and environmental stability. Rhenium diselenide (ReSe_2), as one of the TMDs is predicted to have good nonlinear optical effects by a series of characterization techniques. In this experiment, the prepared ReSe_2 solution was dried and made into a $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ film affixed to the end face of the fiber optic patch cord head to form a SA. The modulation depth and saturable absorption intensity of the diaphragm were 8.8% and 4.9 MW/cm^2 . The saturable absorber was integrated into the fiber cavity and stable conventional solitons were obtained

收稿日期: 2024-10-22

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2021QE178)资助

通信作者: 韩克桢, 男, 汉族, 博士, 副教授, 研究方向: 激光技术与器件, E-mail: kezhenhan@sdut.edu.cn.

at a dispersion of -0.682 ps^2 and a pump power of 143.6 mW . After slightly adjusting the polarization state and pump power, the conventional soliton transformed into a 38th-order stable harmonic mode-locked operation. The experimental results show that ReSe₂ has good pulse modulation capability and has certain applications in Erbium-doped fiber lasers.

Key words rhenium diselenide; transition metal disulfide compounds; conventional soliton; high-order mode-locked

0 引言

自2004年曼彻斯特大学的 Geim 小组首次成功地从石墨中分离出石墨烯以来,二维材料便引起人们广泛的关注^[1]。由于二维材料特殊的光电性能,其在能源领域、生物医疗、电子和光电等领域取得了广泛的应用^[2]。目前基于二维材料可饱和吸收体的光纤激光器被广泛研究^[3-6]。二维材料可饱和吸收体相较于传统的半导体可饱和吸收镜(SESAMs)相比,具有较宽的吸收带宽和快速的响应时间等优点^[7,8]。

目前已在超快光纤激光器领域内用于脉冲调制的二维材料主要包括石墨烯^[9-11]、过渡金属硫化物(TMDs)^[12-14]和黑磷(BP)^[15-17]等。2009年,Bao 等人利用石墨烯作为可饱和吸收体,在光纤激光器中首次获得了 756 fs 的超短孤子脉冲,并通过改变石墨烯的层数来控制可饱和吸收体的调制深度^[18]。该实验表明,石墨烯作为可饱和吸收体具有饱和强度低、恢复时间快的特点。然而,由于石墨烯具有零带隙结构,其非线性特性受到严重的限制,因此 BP 和 TMDs 等二维材料开始走进人们的视野。由于 BP 在空气中不稳定会迅速氧化的缺点,因此没有被大量用作可饱和吸收体。与石墨烯和 BP 相比,TMDs 具有可调的带隙结构和较好的环境稳定性,因此在光纤激光器中的应用前景更为广阔^[19-21]。

ReSe₂ 作为 TMDs 家族的一员,具有扭曲的 1T 相结构(1T相)。其晶格结构具有面内各向异性,这使得 ReSe₂ 的光学特性也表现出明显的面内各向异性。ReSe₂ 原子具有三明治结构,两个 Se 原子被一个 Re 原子夹在中间,原子之间以强共价键相连。ReSe₂ 的层间相互作用很弱,因此其带隙对层数的依赖性较低,不会随着层数的增加而大幅度变化。以上的特性使得 ReSe₂ 作为可饱和吸收体在光纤激光器领域具有一定的应用潜力^[22-27]。2019年,Li 和 Wang 等人在掺铒光纤激光器中使用 ReSe₂ 作为可饱和吸收体,均产生了调 Q 脉冲^[28,29]。到目前为止,ReSe₂ 在光纤激光器中的应用以掺铒光纤作为增益介质居多,集中在 1064 nm 波段。该波段损耗较大,且当泵浦功率较高时,光纤的工作稳定性因热效应的影响而变差。相较于掺铒光纤的 1064 nm 波段,掺铒光纤的 $1.5 \mu\text{m}$ 波段具有较好的工作稳定性和最小的光纤损耗率。因此基于 ReSe₂ 可饱和吸收体在掺铒光纤激光器中的研究具有一定的探究价值。

本文研究了 ReSe₂ 的非线性吸收特性并在掺铒光纤超快激光器中实现了应用。利用液相剥离法将 ReSe₂ 纳米片溶液制成可饱和吸收体并集成进掺铒光纤激光腔中。使用双臂探测法测得 ReSe₂ 可饱和吸收体的调制深度和饱和吸收强度分别为 8.8% 和 4.9 MW/cm^2 。在泵浦功率达到 143.6 mW 时,获得了基频为 6.34 MHz 、脉宽为 1.21 ps 、信噪比为 63 dB 的传统孤子。进一步增加泵浦功率并调整腔内偏振态,获得了频率为 241.04 MHz 的 38 阶谐波锁模。该实验证明了 ReSe₂ 具有优秀的脉冲调制能力,在超快光子学领域具有较大的应用潜力。

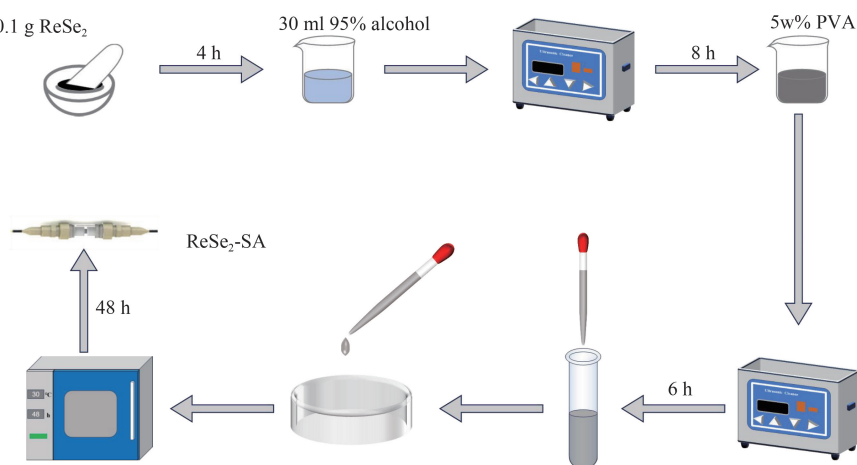


图1 ReSe₂ 可饱和吸收体的制备

Fig. 1 Preparation of ReSe₂-SA

1 ReSe₂ 可饱和吸收体的制备和表征

使用 ReSe₂ 作为可饱和吸收体的制备流程如图 1 所示。首先,将 0.1 g ReSe₂ 粉末置入用酒精擦拭且风干过后的研钵中,进行 4 h 的研磨直至将大颗粒完全碾成粉末。将粉末与 30 mL 95% 的酒精溶液混合后并进行 8 h 的超声处理。将得到的 ReSe₂ 纳米片悬浮液与 5% 的聚乙烯醇(PVA)溶液按 1 : 2 的比例混合,再超声 6 h。最后,将超声后的溶液旋涂在石英玻璃片上,放入 30 ℃ 的烤箱中烘烤。48 h 后,将烘干后的 ReSe₂-PVA 薄膜从玻璃片上剥离,分成 1 mm × 1 mm 的小块,然后将其中一块薄膜集成在光纤跳线的端面上,制成可饱和吸收体。

ReSe₂ 的扫描电子显微镜(SEM)图像如图 2(a)所示。当所选区域的分辨率放大到 100 nm 时,可见清晰的层状结构。ReSe₂ 的透射电子显微镜(TEM)图像如图 2(b)所示。在 5 nm 的尺度下可以清晰地观察到 ReSe₂ 的晶体结构。图 2(c)为 ReSe₂ 的原子力显微镜(AFM)图像,在任意五个位置测量了其厚度,结果如图 2(d)所示。由于单层 ReSe₂ 的厚度为 0.7 nm^[30],可知本实验中使用的 ReSe₂ 材料厚度大约为 9 层。ReSe₂ 的 X 射线衍射图像(XRD)如图 2(e)所示,在(1 0 0)、(-1 2 0)和(-1 -2 2)晶格面上有较高的反射峰,与标准数据(JCPDS: 89-0340)一致。ReSe₂ 的拉曼光谱如图 2(f)所示。在 117.78、123.2、158.25、171.25、178.64 和 259.46 cm⁻¹ 处的峰值比较明显。上述表征反映出本实验所使用的 ReSe₂ 具有良好的层状结构和较高的纯度。

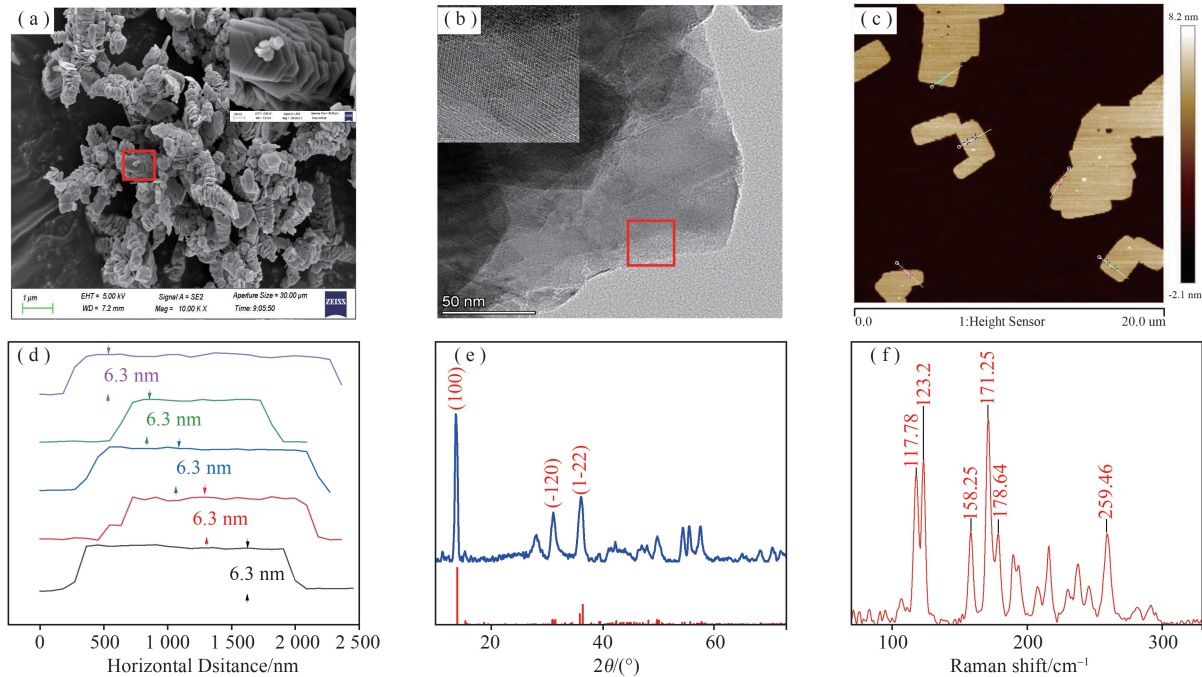


图 2 (a) SEM 图;(b) TEM 图;(c) AFM 图;(d) AFM 厚度测量图;(e) XRD 图;(f) Raman 光谱图

Fig. 2 (a) SEM image of ReSe₂; (b) TEM image of ReSe₂; (c) AFM image of ReSe₂; (d) AFM thickness measurement plot of ReSe₂; (e) XRD spectrum of ReSe₂; (f) Raman spectrum of ReSe₂

为了进一步研究本实验中使用的 ReSe₂ 可饱和吸收体的非线性光学效应,使用如图 3(a)所示的双臂探测器测量了其非线性可饱和吸收特性,并基于以下的公式对测量结果进行拟合。

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

式中 α_{ns} 为不饱和吸光度, α_s 为调制深度, I 为激光输入强度, I_{sat} 为饱和强度。可饱和吸收体的调制深度越大,能得到的脉冲宽度越小。因此适当增加可饱和吸收体调制深度将能够获得更小的脉冲宽度。但是,并非调制深度越大,就越有利于锁模脉冲性能的提升。由于调制深度太大将会引起非饱和吸收损耗的增大,进而不能得到锁模脉冲输出,可能会出现调 Q 脉冲。当然,若调制深度太小,短时间内饱和吸收体的饱和吸收效应并不明显,可能需要很长的时间来形成锁模。因此合适的调制深度对锁模现象的产生变得极其重要。本

次实验所使用的 ReSe₂ 可饱和吸收体透过率随光强的拟合结果如图 3(b)所示。其饱和强度和调制深度分别为 4.9 MW/cm² 和 8.8%,有助于在光纤激光谐振腔中产生锁模现象。

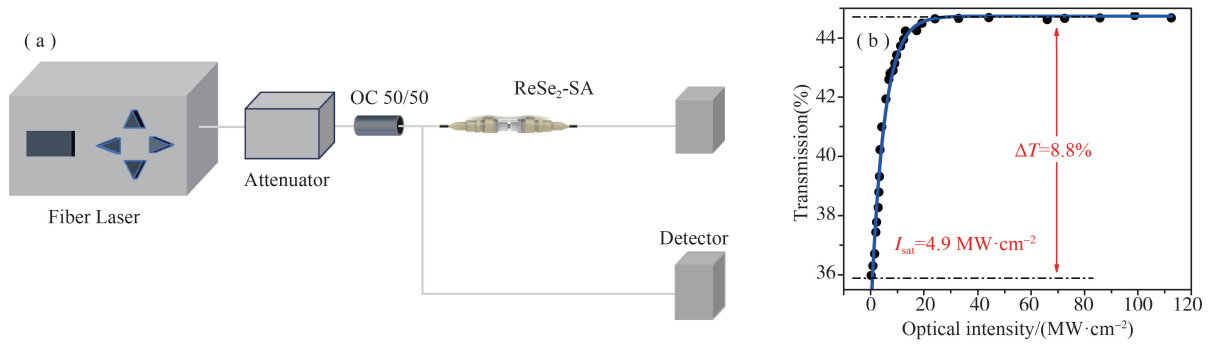


图3 (a) 测试非线性光学特性的实验装置;(b) ReSe₂ 可饱和吸收体的非线性吸收曲线

Fig. 3 (a) Experimental setup of testing nonlinear optical property; (b) Nonlinear absorption curve of the ReSe₂-SA

2 实验搭建

本次实验使用如图4所示的谐振腔结构。泵浦源最大功率为700 mW,输出980 nm的光经过980/1550波分复用器耦合到环型腔中。通过30 cm的掺铒光纤(−46 ps/(nm·km))将980 nm泵浦光激发至1550 nm波段。其中10%的光通过90:10的输出耦合器(OC)输出到光谱仪(Yokogawa AQ6370B)、频谱仪(Rohde & Schwarz FPC1000)、示波器(Wavesufer 3054Z)和自相关仪中(Femtochrome FR-103XL)进行特性分析。偏振无关隔离器(ISO)保证了环型腔中剩余的90%的光的单向传输。使用三明治结构的可饱和吸收体来调制脉冲。通过一个偏振控制器(PC)来调整腔内的偏振态,使腔体稳定在锁模状态。各器件之间通过标准的单模光纤[17 ps/(nm·km)]相连,总腔长为32.4 m。

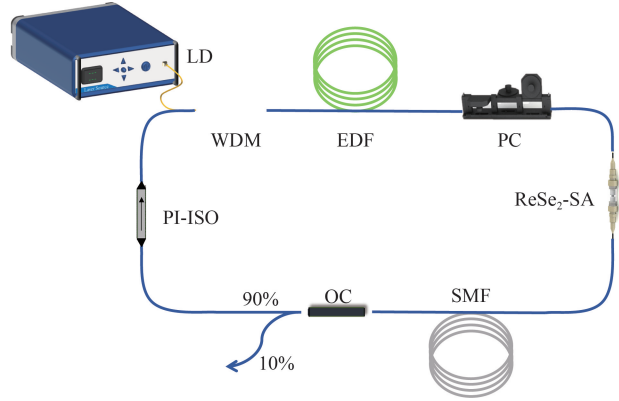


图4 基于 ReSe₂ 可饱和吸收体的光纤激光器实验搭建

Fig. 4 Experimental setup of the fiber laser based on ReSe₂-SA

3 实验结果和讨论

首先,为了确保实验产生的所有现象都是由 ReSe₂ 可饱和吸收体引起。在未加入可饱和吸收体的环型腔中,调整泵浦功率和偏振控制器,未从光谱仪中观察到锁模现象产生。再将贴有 ReSe₂ 薄膜的光纤跳线头接入腔中,调整偏振控制器和泵浦功率,观察到锁模现象产生。这表明 ReSe₂ 可饱和吸收体是锁模现象产生的必要条件。在本次实验中,使用 ReSe₂ 作为可饱和吸收体获得了稳定的传统孤子和高阶谐波锁模。

实验中传统孤子的特征如图5所示。其中脉冲序列图像如图5(a)所示。脉冲间隔为157.7 ns,脉冲强度几乎一致,这表明传统孤子具有良好的稳定性。图5(b)显示了跨度为30 nm的传统孤子的典型光谱,中心波长为1531.6 nm,3 dB带宽为3.1 nm。光谱的两侧有典型的凯利边带,这是传统孤子的主要特征之一。传统孤子的频谱图如图5(c)所示,可见脉冲重复频率为6.34 MHz,与示波器所示的脉冲间隔相对应;信噪比约为63 dB且左上角跨度500 MHz的频谱并未出现明显的断点,表明该传统孤子具有较好的稳定性。用自相关仪测量并通过高斯拟合得到该传统孤子的持续时间为1.21 ps,如图5(d)所示。根据(2)式计算得到该传统孤子的时间带宽积(S_{TBP})为0.48,可知该脉冲存在啁啾。

$$S_{\text{TBP}} = T_{\text{pulse}} \times c \times \left(\frac{\delta_{\lambda}}{\lambda_c^2} \right), \quad (2)$$

式中 T_{pulse} , δ_{λ} 和 λ_c^2 分别为脉冲持续时间,3 dB带宽和中心波长。图5(e)所示为传统孤子的光谱随时间变化的瀑布图。可见该脉冲并没有随时间出现明显变化,具有优异的稳定性。图5(f)为激光器输出功率和单脉冲能量随泵浦功率变化的折线图,输出功率和脉冲能量均随泵浦功率的升高而增大。

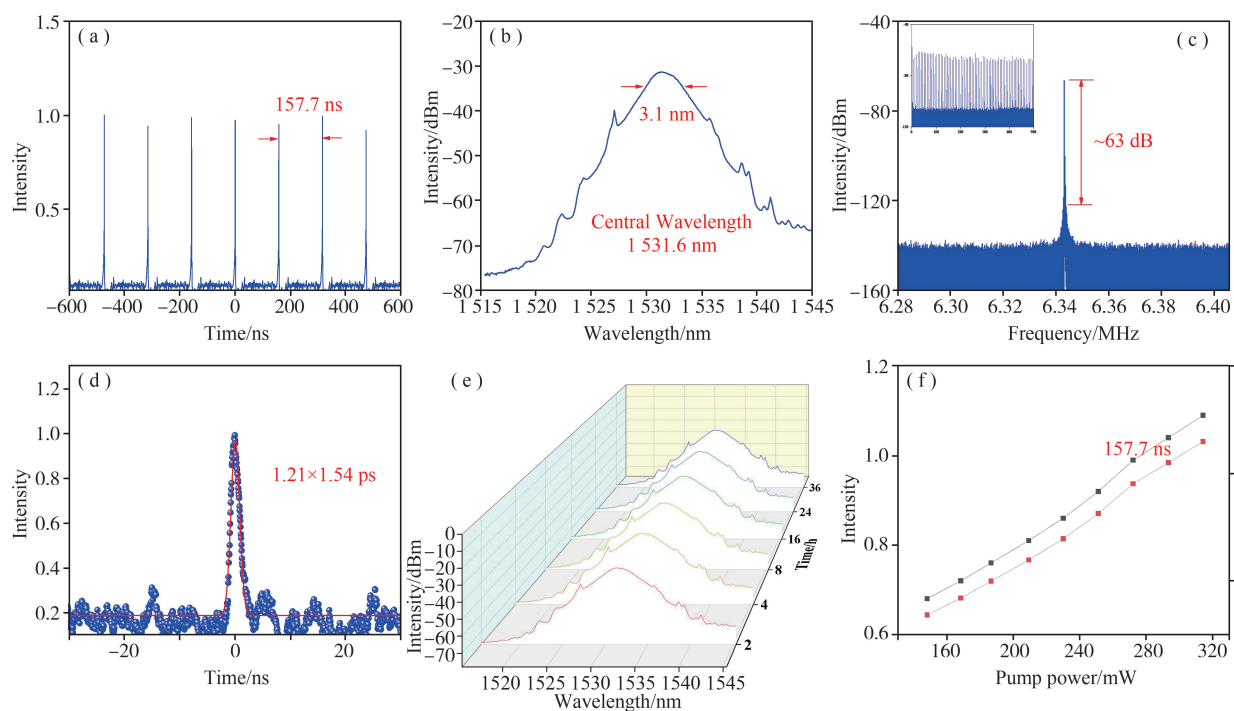


图5 (a) 脉冲序列;(b)光谱;(c) RF 频谱;(d) 自相关轨迹;(e) 不同功率下的光谱;
(f) 泵浦功率和输出功率,脉冲能量之间的关系

Fig. 5 (a) Pulse train;(b) Optical spectrum;(c) RF spectrum;(d) Autocorrelation trace;(e) Optical spectra at different pump powers;(f) The relationship between pump power and output power, pulse energy

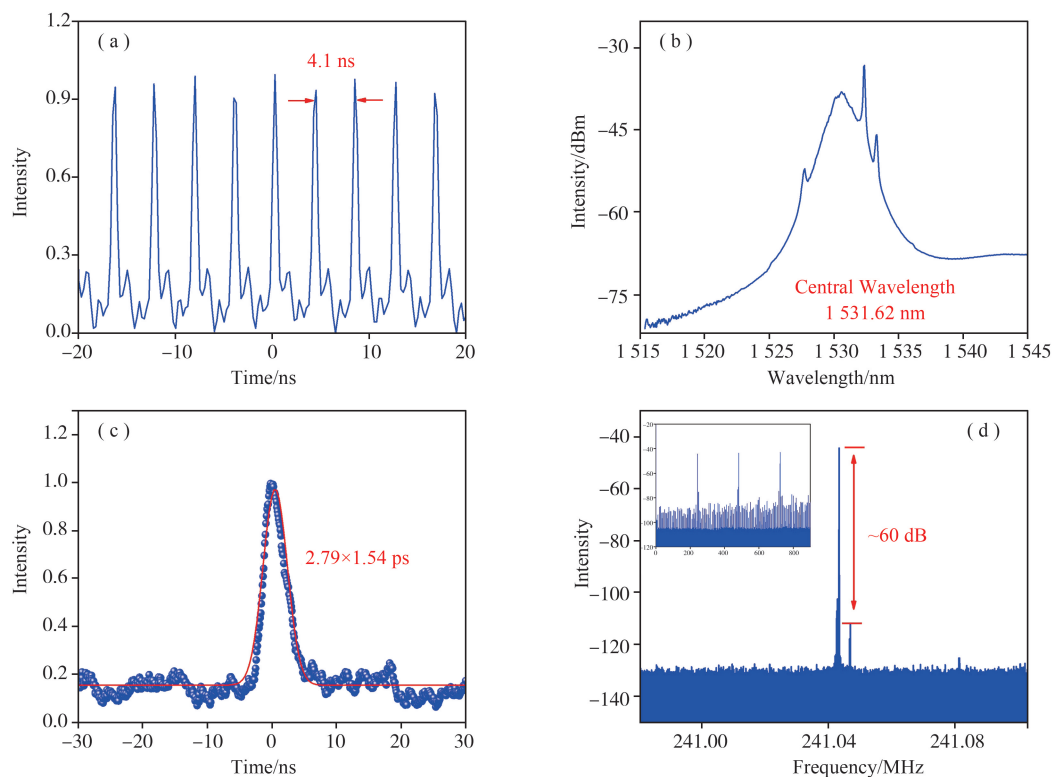


图6 (a) 脉冲序列;(b) 光谱;(c) 自相关轨迹;(d) RF 频谱

Fig. 6 (a) Pulse train;(b) Optical spectrum;(c) Autocorrelation trace;(d) RF spectrum

通过调整腔内的偏振态并持续增加泵功率至 320 mW 时,获得高阶谐波锁模,其脉冲序列如图 6(a)所示,脉冲间隔为 4.1 ns。图 6(b)为该脉冲的典型光谱,中心波长与所获得的传统孤子一致,为 1 531.6 nm。光谱两侧的凯利边带相较于传统孤子表现出明显得减少,这是由于谐波锁模的阶数较高,峰值功率和脉冲能

量降低,从而孤子的扰动减少,最终导致凯利边带退化直至消失,凯利边带上较小的直流分量,这是由于泵浦功率的提高导致谐波锁模不稳定而产生的。图 6(c)为谐波的自相关轨迹图,脉冲宽度为 2.79 ps,明显大于基频锁模的脉冲宽度。频谱如图 6(d)所示,重复频率为 241.04 MHz,表明该锁模为 38 阶谐波,信噪比约为 60 dB,且左上角跨度为 800 MHz 的频谱中未见明显的断点,表明该锁模具有较好稳定性。

对比其他几种可饱和吸收体谐波锁模光纤激光器的参数情况,结果如表 1 所示。可以发现本次实验所设计的基于 ReSe₂ 可饱和吸收体的掺铒激光器的最大重复频率和谐波阶数都远远地超过基于其他可饱和吸收体的掺铒光纤激光器。因此使用 ReSe₂ 可饱和吸收体来调制脉冲具有较大的潜力,在光纤激光器领域有一定的应用价值。

表 1 基于不同可饱和吸收体的谐波锁模光纤激光器的参数比较

Tab. 1 Parameter comparison of harmonic mode-locked fiber lasers based on different SAs

SA	Laser type	Operating wavelength/nm	Maximum Repetition /MHz	Harmonic order	Ref.
Cr ₂ Sn ₂ Te ₆	Er	1 529.50	26.86	2	[31]
Cr ₂ Ge ₂ Te ₆	Er	1 559.09	15.30	3	[32]
Cr ₂ Si ₂ Te ₆	Er	1 568.03	15.99	13	[33]
MoS ₂	Er	1 530.40	125.00	14	[34]
PbSnS ₂	Er	1 552.94	98.71	15	[35]
ReSe ₂	Er	1 531.62	241.04	38	Our Paper

4 总结

综上所述,使用 ReSe₂ 作为可饱和吸收体在掺铒光纤激光器中获得了稳定的传统孤子和 38 阶谐波锁模。使用 SEM,TEM,AFM 和 XRD 等方法对 ReSe₂ 可饱和吸收体进行了表征,结果说明该材料具有优异的光电特性和层状结构。用双臂探测法探究了 ReSe₂ 可饱和吸收体的非线性光学效应,其饱和强度和调制深度分别为 4.9 MW/cm² 和 8.8%。在色散为 -0.682 ps²,泵浦功率为 143.6 mW 的条件下获得了稳定的传统孤子脉冲,中心波长为 1 531.6 nm,脉冲宽度为 1.21 ps。在相同的色散条件下,通过调整腔内偏振态和泵浦功率,获得了稳定的 38 阶基频锁模。该实验充分表明,ReSe₂ 具有良好的非线性光学效应,在掺铒光纤激光器领域具有一定的应用价值。

参 考 文 献

- [1] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696):666-669.
- [2] MIRÓ P, M AUDIFFRED, T HEINE. An atlas of two-dimensional materials[J]. Chemical Society Reviews, 2014. 43(18):6537-6554.
- [3] FU B, SUN J X, WANG G, et al. Solution-processed two-dimensional materials for ultrafast fiber lasers.[J]. Nanophotonics, 2020, 9(8): 2169-2189.
- [4] JIANG T, YIN K, WANG C, et al. Ultrafast fiber lasers mode-locked by two-dimensional materials: review and prospect[J]. Photonics Research, 2019, 8(1): 78-90.
- [5] LUO ZH CH, LUO M, LIU A P, et al. Two-dimensional materials-decorated microfiber devices for pulse generation and shaping in fiber lasers. [J]. Chinese Physics B, 2018. 27(9): 094215.
- [6] WANG J L, WANG X L, LEI J J, et al. Recent advances in mode-locked fiber lasers based on two-dimensional materials[J]. Nanophotonics, 2020, 9(8): 2315-2340.
- [7] ZHANG M, WU Q, CHEN H L, et al. Fiber-based all-optical modulation based on two-dimensional materials[J]. 2D Materials, 2020, 8(1): 012003.
- [8] ZUO Y G, YU W T, LIU C, et al. Optical fibres with embedded two-dimensional materials for ultrahigh nonlinearity[J]. Nature Nanotechnology, 2020, 15(12): 987-991.
- [9] KIM Y, LEE J, YEOM M S, et al. Strengthening effect of single-atomic-layer graphene in metal-graphene nanolayered composites[J]. Nature Communications, 2013, 4(1): 2114.
- [10] LU Q, HUANG R. Nonlinear mechanics of single-atomic-layer graphene sheets[J]. International Journal of Applied Mechanics, 2009, 1

- (03); 443-467.
- [11] VERVUURT R H, KESSELS W M, BOL A A. Atomic layer deposition for graphene device integration[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2017, 4(18): 1700232.
- [12] AFTAB S, M Z IQBAL, Y S RIM. Recent advances in rolling 2D TMDs nanosheets into 1D TMDs nanotubes/nanoscrolls[J]. *Small*, 2023, 19(1): 2205418.
- [13] ALI M, AFZAL A M, WAQAS LQBAL M, et al. 2D-TMDs based electrode material for supercapacitor applications[J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46(15): 22336-22364.
- [14] CHHOWALLA M, LIU Z, ZHANG H. Two-dimensional transition metal dichalcogenide (TMD) nanosheets[J]. *Chemical Society Reviews*, 2015, 44(9): 2584-2586.
- [15] CHENG L, CAI Z W, ZHAO J W, et al. Black phosphorus-based 2D materials for bone therapy[J]. *Bioactive Materials*, 2020, 5(4): 1026-1043.
- [16] GUSMAO R, SOFER Z, PUMERA M. Black phosphorus rediscovered: from bulk material to monolayers[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2017, 56(28): 8052-8072.
- [17] KURIAKOSE S, AHMED T, BALENDHRAN S, et al. Black phosphorus: ambient degradation and strategies for protection[J]. *2D Materials*, 2018, 5(3): 032001.
- [18] BAO Q L, ZHANG H, WANG Y, et al. Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2009, 19(19): 3077-3083.
- [19] LI B L, WANG J P, ZOU H L, et al. Low-dimensional transition metal dichalcogenide nanostructures based sensors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(39): 7034-7056.
- [20] LIN Y X, YU M X, LI X Y, et al. Designed borophene/TMDs hybrid catalysts for enhanced hydrogen evolution reactions[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, 9(44): 15877-15885.
- [21] RAHNESHIN V, KHOSRAVI F, ZIOLKOWSKA D A, et al. Chromatic mechanical response in 2-D layered transition metal dichalcogenide (TMDs) based nanocomposites[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 34831.
- [22] ALCOCK N, KJEKSHUS A. The crystal structure of ReSe_2 [J]. *Acta Chemica Scandinavica*, 1965, 19(1): 79.
- [23] HO C, HUANG Y, TIONG K K. In-plane anisotropy of the optical and electrical properties of ReS_2 and ReSe_2 layered crystals[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2001, 317: 222-226.
- [24] JARIWALA B, VOIRY D, JINDAL A, et al. Synthesis and characterization of ReS_2 and ReSe_2 layered chalcogenide single crystals[J]. *Chemistry of Materials*, 2016, 28(10): 3352-3359.
- [25] MARZIK J V, KERSHAW R, DWIGHT K, et al. Photoelectronic properties of ReS_2 and ReSe_2 single crystals[J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 1984, 51(2): 170-175.
- [26] LEE J, KWONS, KIM T, et al. Nonlinear optical property measurements of rhenium diselenide used for ultrafast fiber laser mode-locking at $1.9 \mu\text{m}$ [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 9320.
- [27] MA M, WEN W, ZHANG Y, et al. Few-layer $\text{ReS}_2(1-x)\text{Se}_{2x}$ nanoflakes for noise-like pulse generation in a mode-locked ytterbium-doped fiber laser[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(23): 6900-6904.
- [28] 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.
- [29] WANG N, LU B L, QI X Y, et al. Passively Q-switched ytterbium-doped fiber laser with ReSe_2 saturable absorber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 116: 300-304.
- [30] ZHAO H, WU J B, ZHONG H X, et al. Interlayer interactions in anisotropic atomically thin rhenium diselenide[J]. *Nano Research*, 2015, 8: 3651-3661.
- [31] LI S, ZHAO Z, CHEN F, et al. Fundamental frequency and second harmonic mode-locked operations in an erbium-doped fiber laser based on $\text{Cr}_2\text{Sn}_2\text{Te}_6$ saturable absorbers[J]. *Optical Materials*, 2024, 150: 115332.
- [32] LIU X, XU N, SHANG X, et al. Third-order harmonic mode-locked and Q-switched Er-doped fiber laser based on a $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ saturable absorber[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(13): 3884-3892.
- [33] XU N, SUN S, SHANG X, et al. Harmonic and fundamental-frequency mode-locked operations in an Er-doped fiber laser using a $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ -based saturable absorber[J]. *Optical Materials Express*, 2021, 12(1): 166-173.
- [34] WANG Y, MAO D, GAN X, et al. Harmonic mode locking of bound-state solitons fiber laser based on MoS_2 saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2015, 23(1): 205-210.
- [35] LI S, WANG P, DU X, et al. Passively harmonic mode-locked erbium-doped fiber lasers based on PbSnS_2 saturable absorbers[J]. *Optical Materials*, 2024, 150: 115190.

(责任编辑:赵海军)