

碳化钛可饱和吸收体锁模掺镱光纤激光器

刘诗晗, 王 蓊*, 晁举庆, 徐斌斌

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年4月25日; 录用日期: 2025年7月1日; 发布日期: 2025年7月10日

摘 要

文章提出了一种基于碳化钛($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)可饱和吸收体的锁模掺镱光纤激光器, 并对其性能进行了研究。通过以 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 溶液与羧甲基纤维素钠(NaCMC)溶液混合的方式制备了碳化钛可饱和吸收体薄膜, 并将其以“三明治”结构集成到环形腔掺镱光纤激光器中, 成功实现了稳定的锁模脉冲输出。实验结果表明, 在泵浦功率200 mW时, 锁模光纤激光器的平均输出功率为6.77 mW, 重复频率为27 MHz, 脉冲宽度为667 fs。这不仅验证了碳化钛在超快光子学应用中的潜力, 也为新型二维材料在激光技术中的进一步开发提供了参考。

关键词

光纤激光器, 锁模, 掺镱光纤, 可饱和吸收体, 碳化钛

$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ Saturable Absorber Mode-Locked Ytterbium-Doped Fiber Laser

Shihan Liu, Ji Wang*, Juqing Chao, Binbin Xu

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jinlin

Received: Apr. 25th, 2025; accepted: Jul. 1st, 2025; published: Jul. 10th, 2025

Abstract

This paper proposes a mode-locked ytterbium-doped fiber laser based on a titanium carbide ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) saturable absorber and investigates its performance. The $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ saturable absorber film was prepared by mixing a titanium carbide solution with a sodium carboxymethyl cellulose (NaCMC) solution as the film-forming agent. The film was integrated into a ring-cavity ytterbium-doped fiber laser in a “sandwich” structure, successfully achieving stable mode-locked pulse output. Experimental results show that, at a pump power of 200 mW, the mode-locked fiber laser achieved an average output power

*通讯作者。

文章引用: 刘诗晗, 王 蓊, 晁举庆, 徐斌斌. 碳化钛可饱和吸收体锁模掺镱光纤激光器[J]. 应用物理, 2025, 15(7): 672-680. DOI: 10.12677/app.2025.157072

of 6.77 mW, a repetition rate of 27 MHz, and a pulse duration of 667 fs. This study not only verifies the potential of titanium carbide in ultrafast photonics applications but also provides a valuable reference for the further development of novel two-dimensional materials in laser technology.

Keywords

Fiber Laser, Mode-Locked, Yb³⁺-Doped Fiber, Saturable Absorber, Ti₃C₂T_x

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

超快激光器以其超短脉冲宽度和高峰值功率的特性,在诸多领域有着广泛应用。在材料加工方面,超短脉冲激光能够避免在加工过程中产生热影响区,提高加工质量和精度,用于高精度微加工、表面处理等[1]。在生物医学领域,可用于眼科手术对角膜组织进行精确切割,也可作为激发光源用于细胞和组织的高分辨率成像,还能对生物组织进行非热损伤处理[2]。在科学研究中,超短脉冲激光是超快光谱学、强场物理和量子信息科学等领域的重要工具[3]。

为了构成紧凑的光纤激光器,可饱和吸收体(SA)在调制激光系统以提供超快激光方面起着非常重要的作用。受稳定、高性价比的超快光纤激光器需求的启发,来自不同领域的研究人员都在努力开发新型光纤激光器。随着低维光学材料的发展,碳纳米管(CNT)[4]-[6]、石墨烯[7][8]、氧化石墨烯(GO)[9]、黑磷(BP)[10]-[13]、拓扑绝缘体(TI)[14]-[16]、金属二硫化物[17]-[19]、过渡金属碳化物(MXene)[20]-[25]等都可以作为可饱和吸收体材料用于锁模光纤激光器。其中,MXene具有宽波段光学响应、高非线性光学性能、易于集成等特点,成为近年来在超快光子学领域研究的主要SA材料之一。2020年Shi等人采用少层Ti₃C₂T_x纳米片作为SA,成功实现了1530.85 nm处掺铒光纤激光器(EDFL)的稳定锁模输出,锁模脉冲持续时间为265 fs,重复频率为8.46 MHz,信噪比为47 dB。此外还在掺镱光纤激光器(YDFL)中获得了792 ps的锁模激光脉冲,信噪比为75 dB[26]。2021年Afiq Arif Aminuddin Jafry等人制备了MXene薄膜(MXene-film)和将MXene沉积在D形光纤(MXene-DS)上的两种SA器件,并将两种SA器件都放入EDFL腔中,MXene-film能产生3.64 ps的锁模激光,脉冲能量为6.03 nJ,MXene-DS能产生4.6 ps的锁模激光,脉冲能量为7.69 nJ,证明了MXene作为SA具有强饱和吸收能力[27]。2021年Rosol等人采用选择性蚀刻法制备MXene Ti₃C₂T_x,并将其嵌入聚乙烯醇(PVA)中形成薄膜。在掺铒光纤激光腔中加入Ti₃C₂T_x薄膜,泵浦功率在55~144 mW之间调节,获得了稳定的孤子锁模激光器。锁模激光的脉宽为3.68 ps,重复频率为1.89 MHz。最大平均输出功率和脉冲能量分别为24.42 m和12.92 nJ[28]。

本文针对当前基于Ti₃C₂T_x可饱和吸收体的超快激光器研究中存在的系统结构复杂、光学器件冗余及成本过高的问题,提出了一种创新性解决方案。通过自主研发的Ti₃C₂T_x-NaCMC可饱和吸收体,并构建其三明治式锁模器件结构,实现了掺镱光纤激光器谐振腔的优化集成。NaCMC为阴离子型水溶性聚合物,其胶体溶液表现出优异的分散稳定性,尤其在高剪切或长时间储存条件下不易发生相分离。这一特性使得碳化钛前驱体浆料更易均匀成膜,减少微观缺陷。相比之下,PVA溶液黏度受温度波动影响显著(高温黏度下降,冷却后恢复),可能引发成膜过程中的厚度不均问题。实验表明,该新型器件在仅需200 mW泵浦功率条件下,即可输出中心波长1064.78 nm的稳定锁模脉冲,脉冲持续时间压缩至677 fs量级,

信噪比提升至 34 dB，同时维持 6.77 mW 的输出功率与 250.7 nJ 的单脉冲能量。相较于传统方案，本研究的突破性在于通过材料界面工程与器件结构创新，显著降低了系统复杂度与光学元件数量，为低成本、高可靠性的超快光纤激光器开发提供了新的技术路径。

2. 实验装置

实验中使用的 SA 是自制的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ SA，将 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 溶液与适量的 NaCMC 溶液混合，放入离心管中进行超声处理，为了使 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 与 NaCMC 溶液充分混合，对该混合溶液进行超声作用超过 10 h。超声处理过的溶液静置后，未发现沉淀，得到均匀分散的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ -NaCMC 溶液。用取液枪将超声分散后的溶液均匀滴涂在洁净的载玻片上，在超净环境下隔尘，沉积成均匀的薄膜。将制备好的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 可饱和吸收体薄膜切成直径 2 mm 的正方形小块，夹在由法兰盘连接的两个 FC/PC 光纤连接器的端面中间，这样就形成了“三明治”结构的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 可饱和吸收体器件。

碳化钛可饱和吸收体锁模掺铒光纤激光器实验结构如图 1 所示，采用环形腔结构，由一台中心波长为 976 nm 的激光二极管(LD)经由 980/1064 nm 波分复用器(WDM)对一段掺铒光纤(YDF, LUSTER Light-Wave Co., Ltd., Yb-1200-4/125)进行泵浦，YDF 的纤芯直径为 4 μm 、数值孔径为 0.2、色散系数为 24 ps²/km，在 980 nm 的峰值吸收为 280 dB/m，长度为 1 m。自制的“三明治”结构 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ SA 为锁模元件。保偏隔离器(PD-ISO)使光信号只能单向传输，同时保持光信号的偏振状态，进而提高系统的稳定性和可靠性。为了使锁模脉冲更加稳定，在环形腔内加入了一个偏振控制器(PC)。最后，经过耦合器(OC)将环形腔内 20% 的光作为输出，80% 的光继续留在腔内循环。激光器腔内所有器件的尾纤型号均为 HI1060，其色散系数为 23 ps²/km。实验中使用功率计(Thorlabs-PM100D)、光谱仪(YOKOGAWA-AQ6375)、示波器(TeKtronix-MDO3054)、频谱分析仪(Agilent-E4407B)、自相关仪(PulseCheck-SM-2000)，对激光器输出信号的功率、光谱和脉冲特性进行测量。

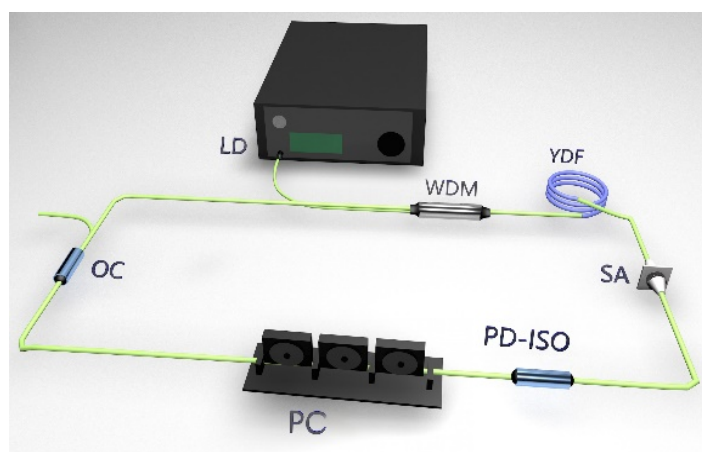


Figure 1. Schematic diagram of a fiber laser with a $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ SA

图 1. 碳化钛可饱和吸收体光纤激光器结构图

3. 实验结果与分析

图 2 为锁模光纤激光器输出功率随泵浦功率的变化曲线，在锁模光纤激光器的性能分析中，泵浦功率与输出功率的关联性呈现出典型的线性响应。实验数据表明，当泵浦功率从 50 mW 提升至 200 mW 时，输出功率由 0.75 mW 线性增长至 6.77 mW，对应的斜率效率为 4.66%。这一数值反映了激光器在阈值以上工作区间的能量转换效率，该线性区间内光腔损耗保持相对稳定，符合理想激光工作模型。

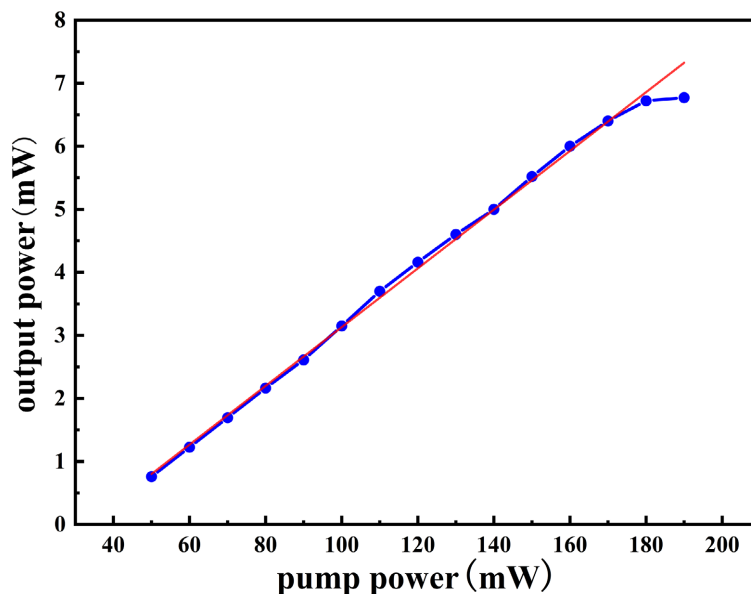


Figure 2. The curve of the output power of the laser versus the pump power
图 2. 激光器输出功率随泵浦功率的变化曲线

图 3 为锁模光纤激光器输出的光谱图, 激光输出中心波长为 1064.78 nm, 3 dB 光谱带宽达到 8.60 nm。结合功率特性曲线可知, 在有效工作区间内, 激光器同时实现了功率的线性增长和光谱质量的稳定维持, 表明系统在 200 mW 泵浦功率以下具备良好的工作可靠性。

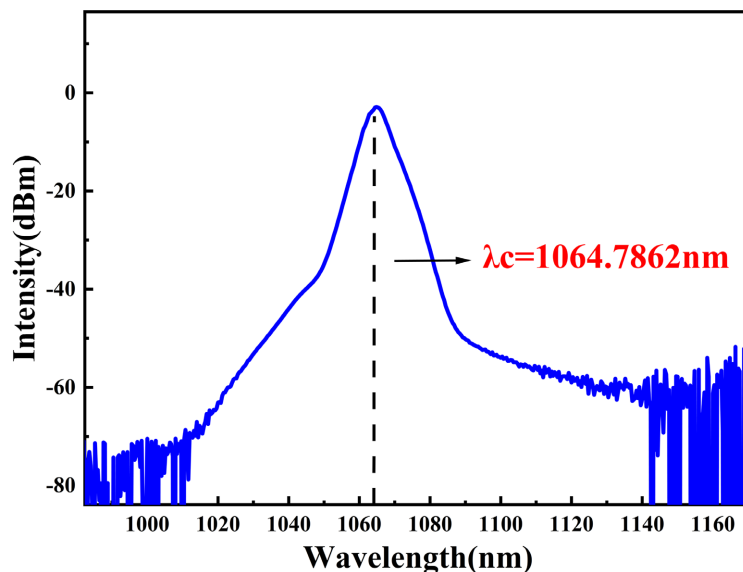


Figure 3. Spectrum output of the laser at a pump power of 200 mW
图 3. 泵浦功率 200 mW 时激光器输出的光谱

泵浦功率从 50 mW 增加到 200 mW 时, 示波器显示的脉冲序列呈现稳定状态, 脉冲峰值没有巨大的抖动。图 4 为泵浦功率为 200 mW 时, 激光器的脉冲序列, 此时每个脉冲的时间间隔为 3.7 ns, 重复频率为 27 MHz。在 2 μs 时间窗内连续观测的脉冲序列插图中, 整体能够看出脉冲峰值没有巨大的抖动, 说明该激光器的脉冲输出表现出很高的稳定性。

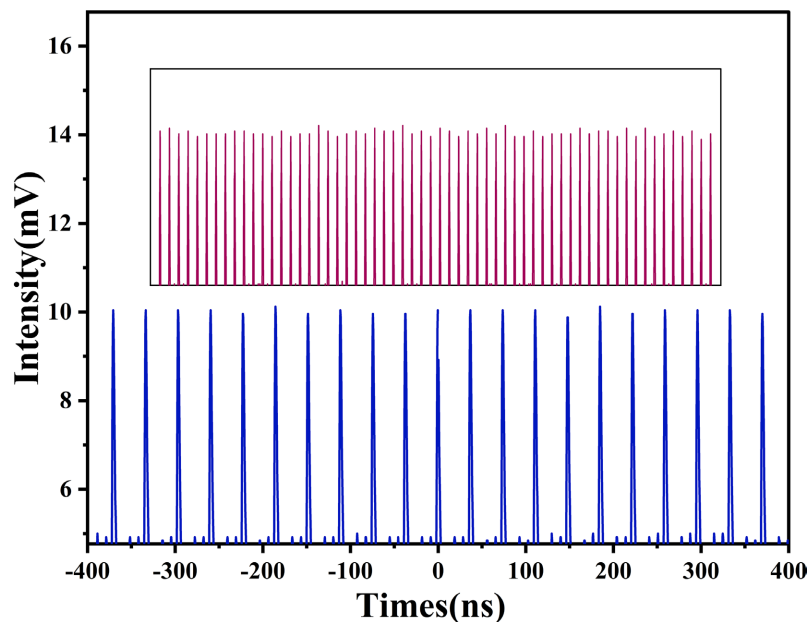


Figure 4. Output pulse train of the laser at a pump power of 200 mW

图 4. 泵浦功率 200 mW 时激光器输出脉冲序列

当泵浦功率为 200 mW 时观察频谱仪所得的数据, 在频谱仪的分辨率带宽为 100 kHz 时, 如图 5 所示测得信噪比为 34 dB。

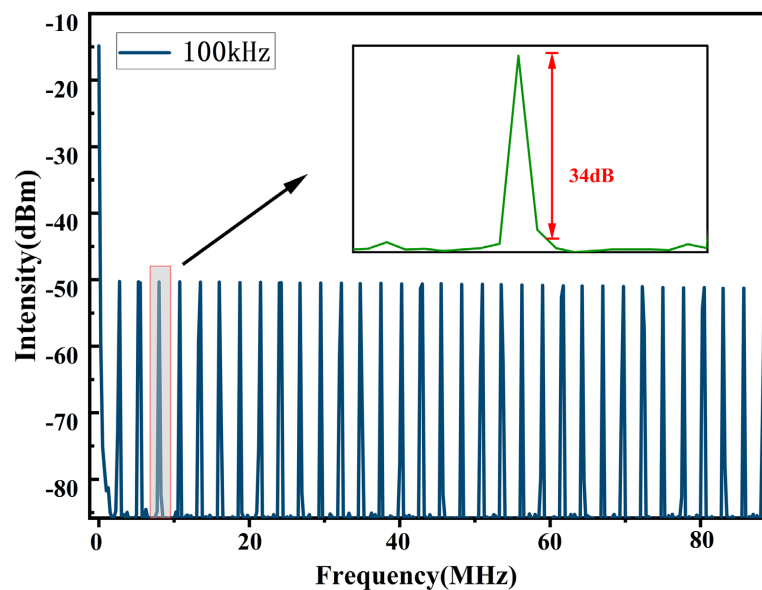


Figure 5. Frequency spectrum of the pulse at a pump power of 200 mW

图 5. 泵浦功率 200 mW 时脉冲的频谱图

图 6 所示为输出脉冲的自相关曲线, 通过自相关仪测量绘制, 设置 Gaussian 函数对自相关轨迹进行拟合, 得到此时的自相关轨迹脉宽 944 fs, 根据高斯脉冲的时域宽度换算关系(实际脉宽 = 自相关脉宽 $\times$ 0.707), 计算得到激光器输出脉冲的实际脉宽为 667 fs。通过计算可以得到此时激光器输出的单脉冲能量为 250.7 nJ。

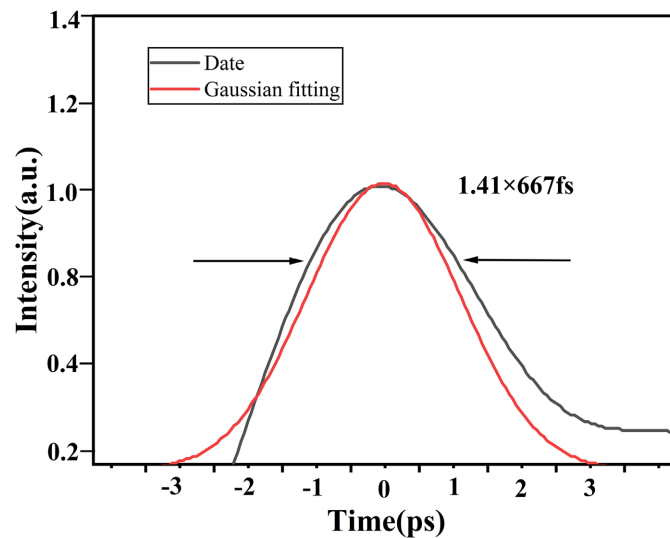


Figure 6. Autocorrelation curve of the output pulse at a pump power of 200 mW
图 6. 泵浦功率 200 mW 时输出脉冲自相关曲线

为了验证基于 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-NaCMC}$ 可饱和吸收体的掺镱锁模光纤激光器输出脉冲信号的稳定性, 利用光功率计实时监测了该激光器在系统中长时间连续运转时的平均输出功率。将泵浦功率稳定在 200 mW, 每隔 1 小时记录一次该泵浦功率下激光器的输出功率、脉冲宽度。实验结果如图 7 所示, 在激光器连续运行的 4 小时内, 该激光器的平均输出功率为 6.77 mW, 波动范围为 $\pm 5\%$, 说明激光器输出具有良好的稳定性。

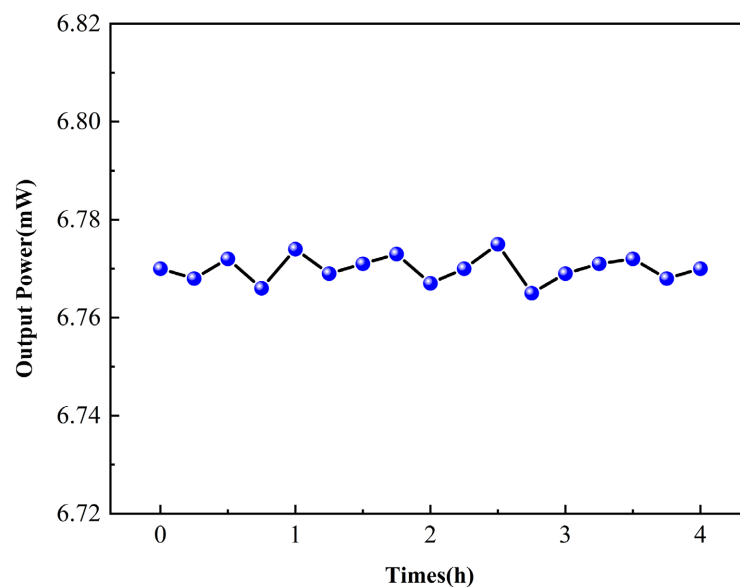


Figure 7. Average output power graph of a mode-locked laser over a 4-hour period
图 7. 锁模激光器在 4 小时内的平均输出功率图

在锁模光纤激光器长时间稳定性测试中, 系统展现了优异的光谱维持能力。实验数据表明, 在持续 4 小时的连续锁模运行过程中, 激光输出光谱的 3 dB 带宽中心波长偏移量始终控制在 ± 1.5 nm 以内。如图 8 记录的时域演变图谱显示, 未出现谱线分裂现象。

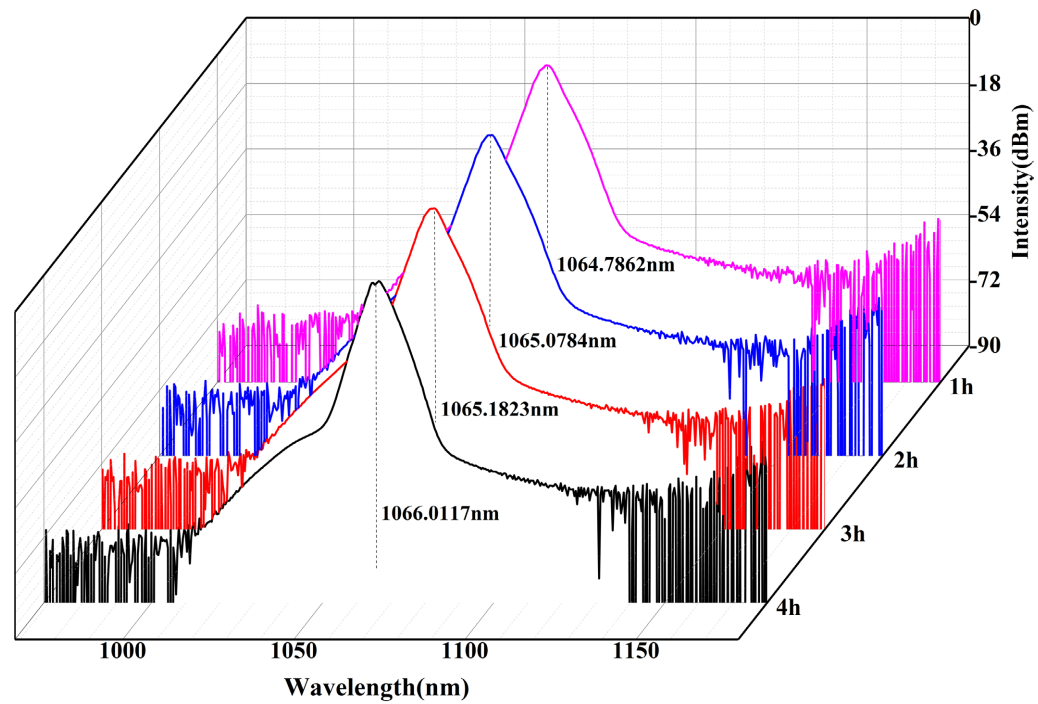


Figure 8. Output spectrum of a mode-locked laser over a 4-hour period
图 8. 锁模激光器在 4 小时内的输出光谱图

Table 1. Comparison of output performance in mode-locked fiber lasers using different two-dimensional materials
表 1. 不同二维材料锁模光纤激光器输出性能的比较

二维材料	中心波长	脉冲宽度	输出功率	单脉冲能量	参考文献
BP	1064.4 nm	51 ps	18.9 mW	1.13 nJ	30
PtSe ₂	1064.47 nm	470 ps	12.19 mW	2.31 nJ	31
Bi ₂ Te ₃	1057.82 nm	230 ps	0.86 mW	0.21 nJ	32
Sb ₂ Te ₃	1047.1 nm	5.9 ps	4 mW	0.21 nJ	33
CH ₃ NH ₃ PbI ₃	1064 nm	931 ps	15.7 mW	3.85 nJ	34
Ti ₃ C ₂ T _x	1064.78 nm	667 fs	6.77 mW	250.7 nJ	本文

表 1 列举了本文所述 Ti₃C₂T_x 与近年来基于各种二维材料产生脉冲的性能参数[29]-[33]。从表中可以看出, 所有材料工作波长都在一微米附近, Ti₃C₂T_x 表现出最短脉冲宽度(667 fs)和最高单脉冲能量(250.7 nJ), 其中心波长(1064.78 nm)与 BP (1064.4 nm)、PtSe₂ (1064.47 nm)接近, 但脉冲宽度较 Sb₂Te₃ (5.9 ps)缩短 3 个数量级, 单脉冲能量较 CH₃NH₃PbI₃ (3.85 nJ)提升 65 倍, 综合性能优势显著, 适用于高精度超快激光领域。

4. 结论

综上所述, 通过将制备的 Ti₃C₂T_x-NaCMC 溶液用常规沉积法沉积在载玻片上获得了 Ti₃C₂T_x 可饱和吸收体, 并将此制成“三明治”结构的可饱和吸收体器件, 然后插入到环形腔掺铒光纤激光器中, 实现了锁模激光输出。在 50~200 mW 的泵浦功率下, 均有稳定的锁模脉冲序列。泵浦功率为 200 mW 时, 激光器得到最大平均输出功率为 6.77 mW, 中心波长为 1064.78 nm, 脉冲持续时间为 667 fs, 信噪比为 34

dB。这表明 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 可以作为可饱和吸收体应用于 $1\ \mu\text{m}$ 波段锁模掺铋光纤激光器。

基金项目

吉林省科技厅国际合作项目(20220402021 GH)。

参考文献

- [1] Sugiooka, K. and Cheng, Y. (2014) Ultrafast Lasers—Reliable Tools for Advanced Materials Processing. *Light: Science & Applications*, **3**, e149. <https://doi.org/10.1038/lsa.2014.30>
- [2] Sha, W., Chanteloup, J. and Mourou, G. (2022) Ultrafast Fiber Technologies for Compact Laser Wake Field in Medical Application. *Photonics*, **9**, Article 423. <https://doi.org/10.3390/photonics9060423>
- [3] Leefmans, C.R., Parto, M., Williams, J., Li, G.H.Y., Dutt, A., Nori, F., *et al.* (2024) Topological Temporally Mode-Locked Laser. *Nature Physics*, **20**, 852-858. <https://doi.org/10.1038/s41567-024-02420-4>
- [4] Kieu, K. and Wise, F.W. (2009) Soliton Thulium-Doped Fiber Laser with Carbon Nanotube Saturable Absorber. *IEEE Photonics Technology Letters*, **21**, 128-130. <https://doi.org/10.1109/lpt.2008.2008727>
- [5] Chernysheva, M., Araimi, M.A., Rance, G.A., Weston, N.J., Shi, B., Saied, S., *et al.* (2018) Revealing the Nature of Morphological Changes in Carbon Nanotube-Polymer Saturable Absorber under High-Power Laser Irradiation. *Scientific Reports*, **8**, Article No. 7491. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24734-z>
- [6] Lazdovskaia, U.S., Orekhov, I.O., Ismael, A., Feifei, Y., Dvoretzkiy, D.A., Sazonkin, S.G., *et al.* (2023) High-Density Well-Aligned Single-Walled Carbon Nanotubes for Application as a Saturable Absorber with a High-Pass Filter Effect in an Erbium-Doped Ultra-Short-Pulse Fiber Laser. *ACS Applied Nano Materials*, **6**, 23410-23417. <https://doi.org/10.1021/acsanm.3c04766>
- [7] Zhang, R., Wang, J., Liao, M., Li, X., Guan, P., Liu, Y., *et al.* (2019) Generation of Wide-Bandwidth Pulse with Graphene Saturable Absorber Based on Tapered Fiber. *Chinese Physics B*, **28**, Article ID: 034203. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/28/3/034203>
- [8] 史瑞平, 白杨, 祁媚, 魏洪铎, 任兆玉, 白晋涛. 基于石墨烯的 1064 nm 连续锁模超短脉冲激光器[J]. 应用光学, 2014, 35(1): 159-162.
- [9] Sobon, G., Sotor, J., Jagiello, J., Kozinski, R., Zdrojek, M., Holdynski, M., *et al.* (2012) Graphene Oxide vs Reduced Graphene Oxide as Saturable Absorbers for Er-Doped Passively Mode-Locked Fiber Laser. *Optics Express*, **20**, 19463-19473. <https://doi.org/10.1364/oe.20.019463>
- [10] Li, J., Luo, H., Zhai, B., Lu, R., Guo, Z., Zhang, H., *et al.* (2016) Black Phosphorus: A Two-Dimension Saturable Absorption Material for Mid-Infrared Q-Switched and Mode-Locked Fiber Lasers. *Scientific Reports*, **6**, Article No. 30361. <https://doi.org/10.1038/srep30361>
- [11] Sotor, J., Sobon, G., Macherzynski, W., Paletko, P. and Abramski, K.M. (2015) Black Phosphorus Saturable Absorber for Ultrashort Pulse Generation. *Applied Physics Letters*, **107**, Article ID: 051108. <https://doi.org/10.1063/1.4927673>
- [12] Zhang, B., Lou, F., Zhao, R., He, J., Li, J., Su, X., *et al.* (2015) Exfoliated Layers of Black Phosphorus as Saturable Absorber for Ultrafast Solid-State Laser. *Optics Letters*, **40**, 3691-3694. <https://doi.org/10.1364/ol.40.003691>
- [13] Wang, Z., Xu, Y., Guo, Z., Zhao, C. and Zhang, H. (2016) Black Phosphorus Quantum Dots (BPQDs) Saturable Absorber for the Passive Mode-Locking of an Er-Doped Fiber Laser. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, San Jose, 5-10 June 2016, 1-2. https://doi.org/10.1364/cleo_si.2016.stu1r.2
- [14] Yan, P., Lin, R., Ruan, S., Liu, A., Chen, H., Zheng, Y., *et al.* (2015) A Practical Topological Insulator Saturable Absorber for Mode-Locked Fiber Laser. *Scientific Reports*, **5**, Article No. 8690. <https://doi.org/10.1038/srep08690>
- [15] Al-Masoodi, A.H.H., Ahmad, F., Ahmed, M.H.M., Arof, H. and Harun, S.W. (2017) Q-Switched Ytterbium-Doped Fiber Laser with Topological Insulator-Based Saturable Absorber. *Optical Engineering*, **56**, Article ID: 056103. <https://doi.org/10.1117/1.oe.56.5.056103>
- [16] Mondal, S., Ganguly, R. and Mondal, K. (2021) Topological Insulators: An In-Depth Review of Their Use in Modelocked Fiber Lasers. *Annalen der Physik*, **533**, Article ID: 2000564. <https://doi.org/10.1002/andp.202000564>
- [17] Mohanraj, J., Velmurugan, V. and Sivabalan, S. (2016) Transition Metal Dichalcogenides Based Saturable Absorbers for Pulsed Laser Technology. *Optical Materials*, **60**, 601-617. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.09.007>
- [18] Mao, D., Zhang, S., Wang, Y., Gan, X., Zhang, W., Mei, T., *et al.* (2015) WS_2 Saturable Absorber for Dissipative Soliton Mode Locking at 106 and 155 μm . *Optics Express*, **23**, 27509-27519. <https://doi.org/10.1364/oe.23.027509>
- [19] Chen, H., Yin, J., Yang, J., Zhang, X., Liu, M., Jiang, Z., *et al.* (2017) Transition-Metal Dichalcogenides Heterostructure Saturable Absorbers for Ultrafast Photonics. *Optics Letters*, **42**, 4279-4282. <https://doi.org/10.1364/ol.42.004279>

- [20] Wang, C., Gao, L., Chen, H., Xu, Y., Ma, C., Yao, H., *et al.* (2021) Broadband and Ultrafast All-Optical Switching Based on Transition Metal Carbide. *Nanophotonics*, **10**, 2617-2623. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0066>
- [21] Wang, Y., Wang, Y. and He, J. (2023) 2D Transition Metal Carbides (MXenes) for Third Order Nonlinear Optics: Status and Prospects. *Laser & Photonics Reviews*, **17**, Article ID: 2200733. <https://doi.org/10.1002/lpor.202200733>
- [22] 姚杰, 王勇刚, 李永放. 基于 WS₂ 可饱和吸收体的脉冲激光器研究[J]. 应用光学, 2018, 39(2): 279-283.
- [23] Yang, Z., Gao, L., Chen, H., Zhang, F., Yang, Q., Ren, X., *et al.* (2021) Broadband Few-Layer Niobium Carbide MXene as Saturable Absorber for Solid-State Lasers. *Optics & Laser Technology*, **142**, Article ID: 107199. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107199>
- [24] Hantanasirisakul, K. and Gogotsi, Y. (2023) Electronic and Optical Properties of 2D Transition Metal Carbides and Nitrides (MXenes). In: Gogotsi, Y., Ed., *MXenes*, Jenny Stanford Publishing, 135-205. <https://doi.org/10.1201/9781003306511-10>
- [25] Wang, J., Wang, Y., Liu, S., Li, G., Zhang, G. and Cheng, G. (2020) Nonlinear Optical Response of Reflective MXene Molybdenum Carbide Films as Saturable Absorbers. *Nanomaterials*, **10**, Article 2391. <https://doi.org/10.3390/nano10122391>
- [26] Shi, Y., Xu, N. and Wen, Q. (2020) Ti₂Ct_x (T = O, OH or F) Nanosheets as New Broadband Saturable Absorber for Ultrafast Photonics. *Journal of Lightwave Technology*, **38**, 1975-1980. <https://doi.org/10.1109/jlt.2020.2973805>
- [27] Jafry, A.A.A., Muhammad, A.R., Kasim, N., Rosol, A.H.A., Rusdi, M.F.M., Ab Alim, N.N.N., *et al.* (2021) Ultrashort Pulse Generation with MXene Ti₃C₂T_x Embedded in PVA and Deposited Onto D-Shaped Fiber. *Optics & Laser Technology*, **136**, Article ID: 106780. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106780>
- [28] Rosol, A.H.A., Jafry, A.A.A., Nizamani, B., Zulkippli, N.F., Khudus, M.I.M.A., Yasin, M., *et al.* (2021) MXene Ti₃C₂T_x Thin Film as a Saturable Absorber for Passively Mode-Locked and Q-Switched Fibre Laser. *Journal of Modern Optics*, **68**, 984-993. <https://doi.org/10.1080/09500340.2021.1967494>
- [29] Li, Y., He, Y., Cai, Y., Chen, S., Liu, J., Chen, Y., *et al.* (2018) Black Phosphorus: Broadband Nonlinear Optical Absorption and Application. *Laser Physics Letters*, **15**, Article ID: 025301. <https://doi.org/10.1088/1612-202x/aa94e3>
- [30] Yuan, J., Mu, H., Li, L., Chen, Y., Yu, W., Zhang, K., *et al.* (2018) Few-Layer Platinum Diselenide as a New Saturable Absorber for Ultrafast Fiber Lasers. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **10**, 21534-21540. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b03045>
- [31] Chi, C., Lee, J., Koo, J. and Han Lee, J. (2014) All-Normal-Dispersion Dissipative-Soliton Fiber Laser at 1.06 μm Using a Bulk-Structured Bi₂Te₃ Topological Insulator-Deposited Side-Polished Fiber. *Laser Physics*, **24**, Article ID: 105106. <https://doi.org/10.1088/1054-6624/10/105106>
- [32] Kowalczyk, M., Bogusławski, J., Zybala, R., Mars, K., Mikula, A., Soboń, G. and Sotor, J. (2016) Sb₂Te₃-Deposited D-Shaped Fiber as a Saturable Absorber for Mode-Locked Yb-Doped Fiber Lasers. *Optical Materials Express*, **6**, 2273-2282. <https://doi.org/10.1364/OME.6.002273>
- [33] Li, P., Chen, Y., Yang, T., Wang, Z., Lin, H., Xu, Y., *et al.* (2017) Two-Dimensional CH₃NH₃PbI₃ Perovskite Nanosheets for Ultrafast Pulsed Fiber Lasers. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 12759-12765. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b01709>