光电器件

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20250901002

基于二硫化钛的双波长掺铒锁模光纤激光器

黄天宇[1,2,4],张晓祥[2,4],顾骏华[2,4],戚 昱[2,4],陶文卓[2,4],常建华[2,3*]

(南京信息工程大学 1. 天长研究院,安徽 天长 239300; 2. 电子与信息工程学院,南京 210044;
3. 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心,南京 210044;
4. 浦口经开区创新港研究生联培基地,南京 210044)

摘 要: 文章利用光纤倏逝场耦合效应,设计了一种基于二硫化钛(TiS_2)可饱和吸收体的锁模光纤激光器。通过液相剥离法制备TiS_2纳米片溶液,并与聚乙烯醇溶液混合,采用旋涂烘干法制成薄膜,转移至以聚二甲基硅氧烷薄膜为基底的锥形光纤表面,最终制备成全光纤可饱和吸收器件,其调制深度和饱和强度分别为7.56%和6.85 MW/cm^2。实验结果表明,将器件接入掺铒光纤激光腔内,当泵浦功率为86 mW时,获得中心波长为1 530.25 nm的锁模脉冲输出;当泵浦功率为163 mW时,通过调节偏振控制器,能同时输出中心波长为1 531.5 nm和1 558.5 nm的双波长孤子锁模。该器件不仅具备成本低、制作工艺简便的优势,还表明TiS_2具有作为一种低成本的可饱和吸收材料的潜质,在掺铒光纤激光器领域中具有重要应用意义。

关键词: 光纤激光器; 孤子锁模; 二硫化钛; 可饱和吸收体

中图分类号: TN25 **文章编号:** 1001－5868(2025)06－0998－07

Dual-Wavelength Erbium-Doped Mode-Locked Fiber Laser Based on Titanium Disulfide

HUANG Tianyu[1,2,4], ZHANG Xiaoxiang[2,4], GU Junhua[2,4], QI Yu[2,4], TAO Wenzhuo[2,4], CHANG Jianhua[2,3]

(1. Tianchang Research Institute, Tianchang 239300, CHN; 2. School of Electronics and Information Engineering, Nanjing 210044, CHN; 3. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, CHN; 4. Pukou Economic Development Zone Innovation Port Graduate Joint Training Base, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, CHN)

Abstract: This study designs a mode-locked fiber laser that utilizes a titanium disulfide (TiS_2) saturable absorber by leveraging the fiber evanescent field coupling effect. The TiS_2 nanosheet solution is prepared using the liquid-phase exfoliation method and mixed with a polyvinyl alcohol solution. A thin film is then fabricated through spin-coating and drying, after which it is transferred onto the surface of a tapered fiber, with a polydimethylsiloxane thin film serving as the substrate, to create an all-fiber saturable absorption device. The device exhibits a modulation depth and saturation intensity of 7.56% and 6.85 MW/cm^2, respectively. Experimental results reveal that when the device is integrated into an erbium-doped fiber laser cavity, mode-locked pulse output is achieved at a central wavelength of 1 530.25 nm with a pump power of 86 mW. At a pump power of 163 mW, dual-wavelength soliton mode-locking is observed, with central wavelengths of 1 531.5 and 1 558.5 nm achieved by adjusting the polarization controller. This device is characterized by its low cost and straightforward manufacturing process, underscoring the potential of TiS_2 as an economical saturable

收稿日期:2025－09－01.

基金项目:国家自然科学基金(62175114,62375137).

*通信作者:常建华

absorption material, which holds significant promise for the field of erbium-doped fiber lasers.

Key words: fiber laser; soliton mode-locking; titanium disulfide; saturable absorber

0　引言

锁模光纤激光器因其抗干扰能力强、集成度高和便于全光纤网络的构建而备受关注[1]，在工业加工[2]、精密测量[3]、生物医学成像[4]以及现代通信系统中有着重要的应用[5]。锁模激光器主要分为主动锁模激光器和被动锁模激光器，其中被动锁模光纤激光器具有结构简单、成本低、脉冲宽度窄等优点[6]。在被动锁模光纤激光器中，可饱和吸收体起着至关重要的作用。近年来，不同类型的可饱和吸收体（例如石墨烯[7]、拓扑绝缘体[8]和黑磷[9]等）已被用于超快脉冲的产生。石墨烯具有超快恢复时间和宽光谱吸收的优秀特性，但其有限的光吸收能力使其难以获得较高的调制深度[10-11]；拓扑绝缘体有类似于石墨烯“狄拉克锥”结构的量子物态能提高载流子的输运能力，但其制作过程的成本较高[12-13]；黑磷虽然有大工作带宽和高调制深度，但其易氧化的特性导致其在空气中难以稳定存在[14-15]。

与石墨烯、拓扑绝缘体和黑磷相比，过渡金属硫族化合物（TMDs）具有可调带隙和较好的环境稳定性[16-17]。TMDs是一类化学式为MX_2的统称，具有非零带隙和层数依赖的三阶光学非线性等特性，其中M是第4～10族的过渡金属，X是硫族元素[18-19]。二硫化钛（TiS_2）是具有代表性的一种TMDs，通过减少层数或引入缺陷，TiS_2表现出带隙可调性、载流子迁移率高、自旋轨道耦合强等特性[20-21]。2018年，Ge等利用液相剥离法制备TiS_2纳米片溶液，并将其作为SA应用于光纤激光器中，首次获得中心波长为1 569.5 nm、脉冲宽度为1.04 ps的孤子锁模脉冲[22]。2021年，Shang等通过光沉积法将TiS_2沉积到光纤跳线头表面，将跳线头接入到光纤激光腔内，获得1 556.98 nm中心波长、6.57 ps脉宽的孤子锁模脉冲[23]。然而，光沉积法会导致材料分布不均匀，形成局部堆积或者稀疏，导致可饱和吸收体性能不稳定，同时光信号在接头处损耗较大，且光与TMDs材料的相互作用受模场面积和材料厚度影响，调制深度较低，进而限制了激光器脉冲输出性能。因此，本文提出将TiS_2和聚乙烯醇（PVA）相结合的方法，利用混合PVA溶液制备出的薄膜，其厚度精确可控且重复性高。通过调整PVA浓度比，可以有效控制可饱和吸收体的调制深度，而锥形光纤的倏逝场则增强了光与材料之间的相互作用。最终，成功制备出全光纤可饱和吸收器件，实现孤子锁模脉冲和双波长锁模输出。

基于此，本文采用氢氧火焰法制备锥形光纤，将其转移至以聚二甲基硅氧烷（PDMS）薄膜为基底的石英衬底上。通过锥形光纤所产生的倏逝场，能够延长光与材料之间的相互作用长度，从而显著提高可饱和吸收体的调制深度及器件的损伤阈值。采用液相剥离法制备了TiS_2纳米片溶液，并将其与PVA溶液混合，通过旋涂工艺法制备出均匀的薄膜；经过烘干处理后，薄膜转移至锥形光纤的表面，制备出全光纤可饱和吸收体器件。将该器件集成到环形光纤激光器中，通过调节泵浦功率和偏振控制器（PC），在稳定的锁模状态下最终实现了单波长激光输出，以及可切换的单、双波长激光输出。这对于TMDs在被动锁模光纤激光器中的应用具有重要意义。同时，本研究不仅提供了一种低成本、易于制造的解决方案，而且还为高性能的光纤激光器的设计和应用提供了新的思路，在未来的激光通信、精密测量以及生物医学等领域的应用潜力巨大。

1　器件制备与表征

实验中全光纤可饱和吸收器件结构如图1所示，由石英衬底、PDMS薄膜、经过氢氧火焰拉锥的锥形光纤、TiS_2-PVA薄膜组成。

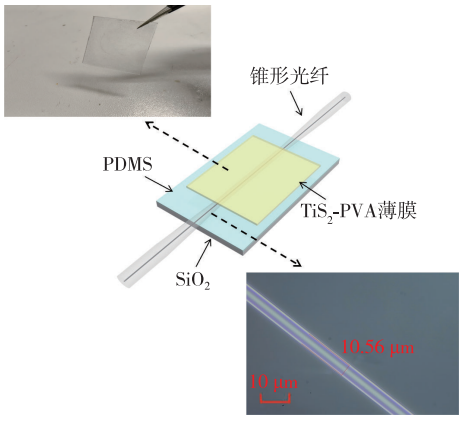


图1　基于TiS_2-PVA可保吸收体全光纤器件的结构示意图

TiS_2-PVA薄膜制备流程如图2所示。首先，将100 mg的TiS_2在研钵中研磨15 min，将所得粉末溶

解于配置的100 mL的乙醇-去离子水溶剂中[24-25]，并使用磁力搅拌机进行充分的搅拌；接着，将混合物放置于冰浴池中，在超声设备中超声处理3 h；然后，将超声好的混合物转移至离心机，以5 000 rpm的转速下离心30 min后取上层清液，与4 wt%的PVA溶液按照1∶1的比例混合并超声6 h，得到TiS_2-PVA分散液；最后，将溶液以500 rpm，70 s和2 000 rpm，15 s旋涂于石英玻璃片上，置于80℃恒温箱中烘烤10 min后，将制备好的薄膜剥离成1 mm×1 mm大小，并用镊子转移至锥形光纤表面。

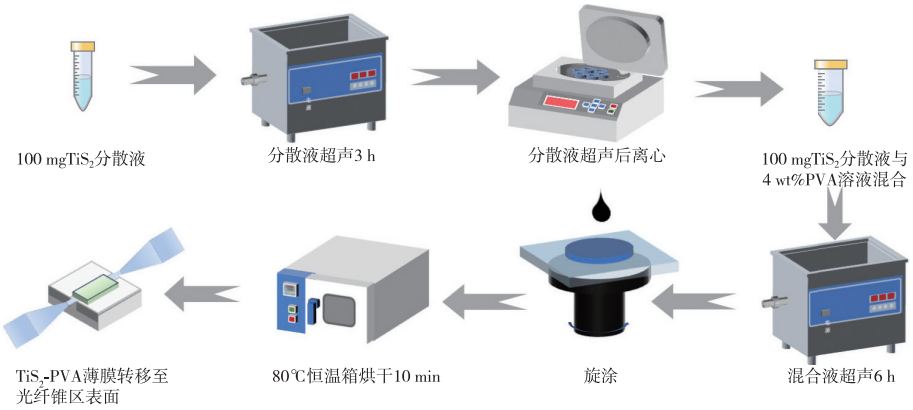
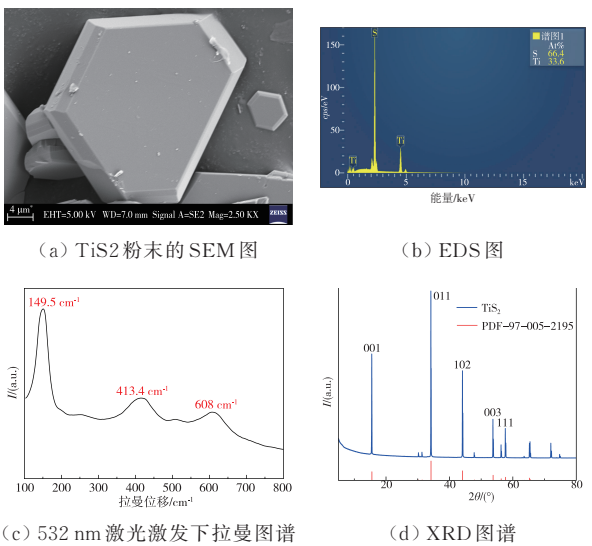


图2 TiS_2-PVA薄膜制作流程图

实验中对TiS_2粉末进行表征。图3(a)显示了在4 μm分辨率下获取的扫描电子显微镜(SEM)图像，图中清楚地展示了TiS_2粉末的层状结构。图3(b)为TiS_2粉末的能量色散X射线能谱(EDS)，其中钛和硫元素的峰值清晰可见。通过拉曼光谱和X射线衍射(XRD)分析样品结构，图3(c)为拉曼光谱，在室温下532 nm激发波长处进行测量，结果显示在413.4 cm^{-1}和608 cm^{-1}处的两个拉曼位移峰。TiS_2的典型拉曼特征峰位于230 cm^{-1}(E_g模式)和330～340 cm^{-1}(A_{1g}模式)[26-27]。然而，本研究中观察到拉曼光谱在413.4 cm^{-1}和608 cm^{-1}处出现两个明显的位移峰，该结果与典型的TiS_2拉曼特征峰有差异，这与样品的少层结构有关。当二维材料减薄至少数层时，层间振动模式的改变和量子限域效应会导致拉曼峰的显著移动。此外，尽管表面轻微氧化的影响无法完全排除，但XRD结果并未检测到氧化物的结晶相[28]。图3(d)为TiS_2粉末的X射线衍射谱，其衍射峰位于001，011，102，003和111，符合TiS_2标准PDF卡片(PDF-97-005-2195)中的晶体谱。



(a) TiS2粉末的SEM图　(b) EDS图

(c) 532 nm激光激发下拉曼图谱　(d) XRD图谱

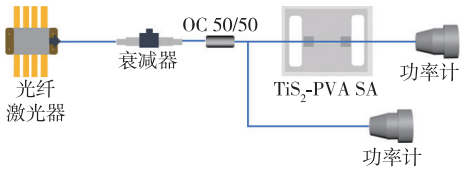
图3 TiS_2表征图

为进一步研究实验中使用的TiS_2-PVA可饱和吸收体的非线性光学性能，采用双臂探测技术进行了精确测定，实验装置如图4(a)所示，结果可表示为[29]：

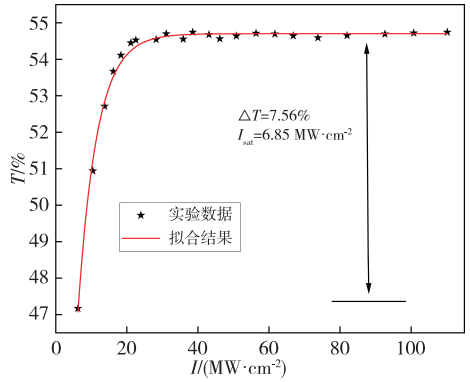
$$T(I)=1-\Delta T e^{(-I/I_{sat})}-T_{ns} \quad (1)$$

式中，$T(I)$是传输率，ΔT是调制深度，I是输入脉冲能量，I_{sat}是饱和强度，T_{ns}是非饱和损耗。

TiS_2-PVA可饱和吸收体的非线性传输曲线如图4(b)所示。通过可饱和吸收模型对曲线进行拟合后，测得调制深度ΔT、饱和强度I_{sat}和非饱和损耗T_{ns}分别为7.56%，6.85 MW/cm^2和45.3%。调制深度的提升能够促使脉冲宽度缩减，可饱和吸收体的这一特性使得窄脉冲更易实现。然而，过大的调制深度会引发非饱和吸收损耗加剧，从而使锁模脉冲输出条件难以达成，甚至可能引发调Q脉冲现象。过浅的调制程度会导致吸收饱和现象难以显现，进而延长锁模形成时间。因此，合理的调制深度对锁模的产生至关重要[30]。



（a）基于 TiS_2-PVA 可饱和吸收体的非线性透射率检测装置



（b）TiS_2-PVA 可饱和吸收体的非线性透射曲线

图 4　TiS_2-PVA 器件表征图

2　实验与结果分析

2.1　实验装置

为研究 TiS_2 可饱和吸收器件的光学特性，构建了如图 5 所示的全光纤环形锁模激光器系统。该激光腔腔长为 24 m，对应于 8.5 MHz 的激光腔共振频率。泵浦光通过波分复用器（WDM）输入激光腔并在掺铒光纤中产生增益光，单向隔离器（ISO）则确保增益光的单向传输，三环式偏振控制器（PC）调整输出的偏振状态，系统中最后 20% 的光用于输出测试，TiS_2 可饱和吸收器件被置于隔离器与偏振控制器之间。实验中利用功率计、数字示波器、光谱分析仪、频谱分析仪和自相关仪等来记录锁模脉冲的相关数据。

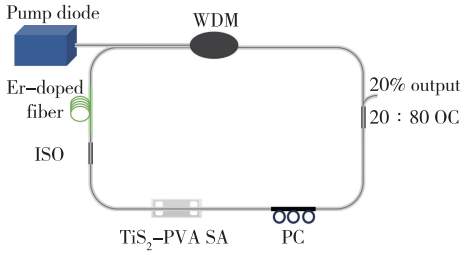


图 5　基于 TiS_2-PVA 可饱和吸收体的光纤环形锁模激光器

2.2　实验结果与讨论分析

实验中，当泵浦功率设为 20 mW 时，示波器显示连续波（CW）输出；当调至 86 mW 时，系统稳定锁模；当增加到 372 mW 时，孤子锁模脉冲开始分裂。如图 6 所示，实验多次测试结果表明，输出功率与泵浦功率成线性关系。当泵浦功率为 300 mW 时，输出功率达到 7.78 mW，光-光转换效率为 2.59%。

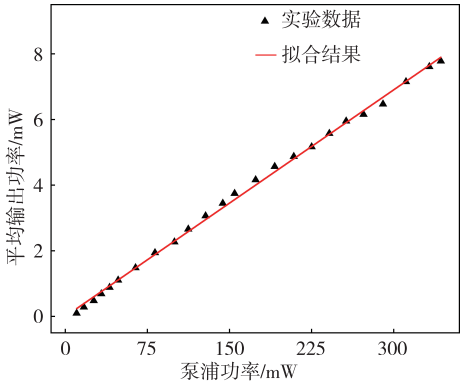
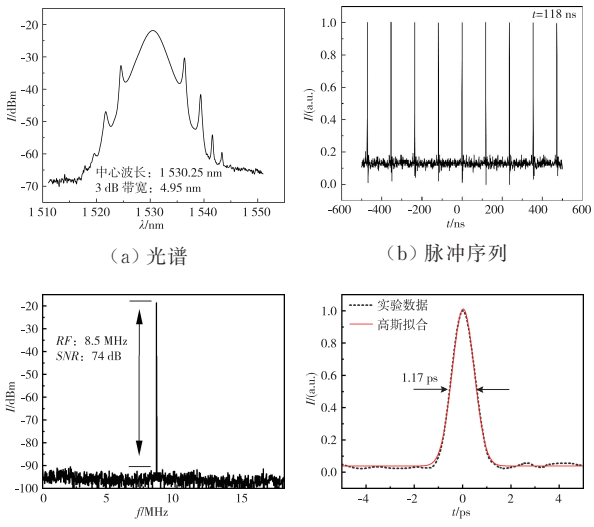


图 6　输出功率与泵浦功率的关系图

图 7（a）展示了泵浦功率为 86 mW 时的脉冲锁模的光谱。该脉冲的中心波长在 1 530.25 nm 处，3 dB 带宽为 4.95 nm，在中心波长的两侧存在相对对称且明显的凯利（Kelly）边带。产生这些边带的原因是脉冲与色散波（DW）相互作用的结果，这一现象是传统孤子的典型特征[31]。图 7（b）显示脉冲周期为 118 ns，符合谐振腔往返时间，说明激光器处于基频锁模状态。图 7（c）展示的基频曲线频率为 8.5 MHz，信噪比为 74 dB，表明锁模稳定性良好。图 7（d）展示了自相关曲线，通过 $sech^2$ 函数拟合[32-33]得出脉冲宽度为 1.17 ps，时间带宽积（TBP）为 0.74，超过理论值 0.315，表明脉冲存在啁啾现象。

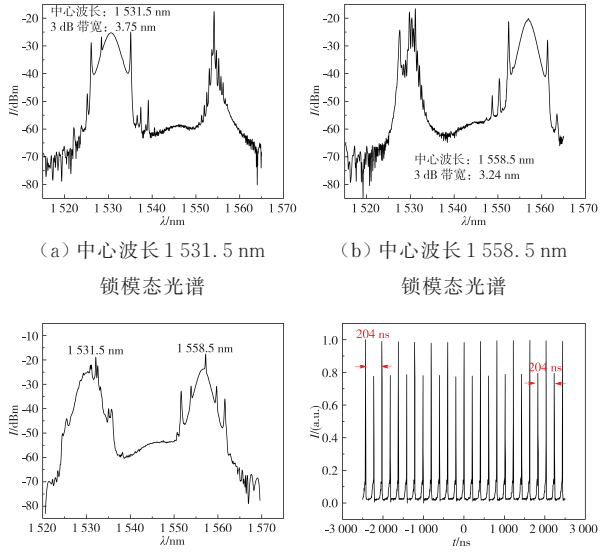


（a）光谱　（b）脉冲序列

（c）射频频谱　（d）自相关曲线

图 7　中心波长 1 530.25 nm 锁模状态下的脉冲输出特性

当泵浦功率提高至163 mW时，如图8(a)和(b)所示，锁模脉冲与连续波开始共存。随着功率的进一步增加，孤子能量达到饱和，多余能量转移至连续波中。当连续波的频率与掺铒光纤增益峰匹配时，连续波呈现边带特征，表明其与色散波相位匹配[34-35]。在泵浦功率保持163 mW的情况下，缓慢调节PC，观察到两个脉冲的强度随之变化。通过调节PC至两个脉冲的强度大致相等，然后观察光谱如图8(c)所示，激光器输出双波长锁模脉冲，中心波长分别为1 531.5 nm和1 558.5 nm，3 dB频谱带宽分别为3.75 nm和3.24 nm，光谱在两个中心波长附近都有明显的凯利边带。由于光纤对不同波长光的折射率(即群折射率)不同，1 531.5 nm与1 558.5 nm的激光脉冲在光纤中具有不同的群速度，导致两个波长脉冲在激光谐振腔内循环一周的往返时间(即周期)存在微小差异(ΔT)。这种由色散引起的单程相对延时(Walk-off)会在脉冲的多次往返过程中逐圈累积[36]，对于第N次往返，累积的相对延时为$N\times\Delta T$。如图8(d)所示，这种时域上的不同步使得双波长脉冲序列在时域上逐渐分离，并影响其非线性相互作用。



(a) 中心波长1 531.5 nm锁模态光谱　(b) 中心波长1 558.5 nm锁模态光谱

(c) 1 531.5～1 558.5 nm双波长锁模态光谱　(d) 双波长锁模时脉冲序列

图8　单双波长图

激光的双波长产生是由TiS_2-PVA可饱和吸收体诱导的高非线性效应、掺铒光纤的增益和吸收，以及光纤腔中双折射和各种损耗引起的滤波效应共同作用的结果[37]。这种综合效应在激光器的增益谱内形成了两个透射窗口，有效抑制了腔内的模式竞争，为双波长激光的产生奠定了基础。具体而言，1 531 nm和1 558 nm波长光在腔内经历的滤波损耗相对较小，而其他波长的光损耗显著，因此只有这两个波长的光能够获得足够的净增益并在腔内振荡并不断放大，形成连续激光(CWs)。空腔中其他波长的光由于损失显著，其强度受到抑制。当泵浦功率超过激光阈值时，激光器产生两个波长的CWs。在此基础上，随着功率进一步升高，激光通过TiS_2-PVA的可饱和吸收特性实现锁模状态。当调节PC时，腔内的双折射和与偏振态相关的各损耗都发生了变化，从而影响腔内的滤波效应，最终影响激光输出光的波长和强度。

对光纤激光器展开持续监测，锁模器件的可靠性由此得到验证。设定泵浦功率为152 mW，每隔30 min采集输出光谱数据并计算均值，持续3 h，如图9所示。结果表明，在记录的时间段内，输出功率波动低于0.1 mW。

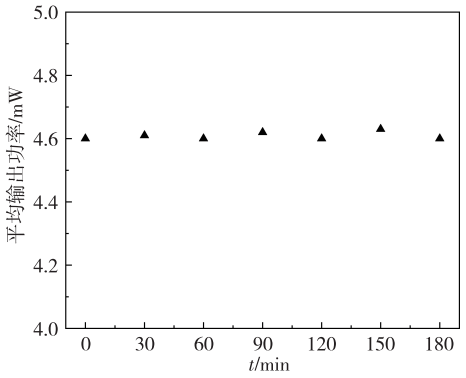


图9　稳定性测试图

根据表1对比发现，本文相较于其余文献中制备的可饱和吸收器件，具有调制深度大、信噪比高、所需泵浦阈值低的优势。在该可饱和吸收器件的制备过程中，如果能够提高TiS_2-PVA薄膜均匀性以及完善可饱和吸收体与锥形光纤贴合性，可进一步提高可饱和吸收器件的输出性能。

表1　基于TMDs的各类光纤锁模激光器的参数对比

材料	泵浦功率/mW	调制深度/%	*SNR*/dB	重复频率/MHz	输出功率/mW	文献
$NbTe_2$	160	2.6	38/65	9.8	3.5	[12]
$NiTe_2$	125	0.7	57/68	22.45	3.67	[36]
C_OPS_3	268	4.68	72/64	7.7	3.15	[8]
TiS_2	195	5.08	55	1.716	2.5	[23]
WS_2	180	1.7	60	2.14	10.2	[37]
TiS_2	163	7.56	74	8.5	7.78	本文

3 结论

本文设计了一种基于TiS_2可饱和吸收体的锁模光纤激光器，该器件将氢氧火焰制备的锥形光纤、TiS_2-PVA薄膜和PDMS薄膜相结合，利用光纤倏逝场耦合效应与TiS_2可饱和吸收体相互作用，其器件调制深度和饱和强度分别为7.56%和6.85 MW/cm^2，光-光转换效率为2.59%。实验结果表明，当泵浦功率为86 mW时，获得了中心波长为1 530.25 nm，3 dB带宽为4.95 nm的单波长锁模脉冲；当泵浦功率为163 mW时，获得了中心波长为1 531.5 nm和1 558.5 nm单-双波长可切换的锁模激光输出。该锁模光纤激光器成本低、器件制备过程简单，为多功能锁模光纤激光器的实现提供了参考和更有效的解决方案。

参考文献：

[1] 陆天一，常建华，戴腾飞，等. 基于碳化钛的亮暗脉冲可切换锁模光纤激光器[J]. 中国激光，2024，51(14)：1401002.
Lu Tianyi，Chang Jianhua，Dai Tengfei，et al. Light/dark-pulsed switching mode-locked fiber laser based on $Ti_3C_2T_x$[J]. Chinese Journal of Lasers，2024，51(14)：1401002.

[2] Chen K，Yao Y L. Process optimisation in pulsed laser micromachining with applications in medical device manufacturing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2000，16(4)：243-249.

[3] Pan R，Sui L，Fu Y，et al. GHz-selectable passive harmonic mode-locking fiber laser based on phosphorus-assisted hybrid mechanism [J]. Optics & Laser Technology，2025，189：113064.

[4] Peng H J，Li Z Y，Tsay S Y，et al. Wavelength tunable Q-switched Er-doped fiber laser based on $ZrSe_2$[J]. Optics & Laser Technology，2022，147：107598.

[5] Beltrano J J，Torrisi L，Campagna E，et al. Er，Cr：YSGG Pulsed laser applied to medical dentistry[J]. Radiation Effects and Defects in Solids，2008，163(4-6)：331-338.

[6] Yang H，Li X，Han D，et al. Tantalum disulfide nanosheets for the generation of polarization domain wall solitons and polarization locked vector solitons [J]. Optics & Laser Technology，2022，149：107895.

[7] Tsai L Y，Li Z Y，Lin J H，et al. Wavelength tunable passive-mode locked Er-doped fiber laser based on graphene oxide nano-platelet [J]. Optics & Laser Technology，2021，140：106932.

[8] Chen F，Zhao Z，Li S，et al. Dual-wavelength erbium-doped mode-locked fiber laser based on $CoPS_3$ saturable absorber[J]. Journal of Luminescence，2024，275：120787.

[9] Lang J，Chen C，Zhang P，et al. C- and L-bands wavelength-tunable mode-locked fiber laser[J]. Photonics，2023，10(12)：1379.

[10] Liu H，Li Y，Mao A，et al. Dual-wavelength erbium-doped fluoride fiber laser[J]. Lasers in Medical Science，2019，34(8)：1665-1670.

[11] Zhou X，Hao H，Bi M，et al. Multi-wavelength SOA fiber laser with ultra-narrow wavelength spacing based on NPR effect[J]. IEEE Photonics Journal，2020，12(5)：7202408.

[12] Hui Z，Wu A，Han D，et al. Switchable single- to multiwavelength conventional soliton and bound-state soliton generated from a $NbTe_2$ saturable absorber-based passive mode-locked erbium-doped fiber laser [J]. ACS Applied Materials & Interfaces，2024，16(17)：22344-22360.

[13] Yang J，Zhao X，Zhang L，et al. Single-cavity dual-comb fiber lasers and their applications [J]. Frontiers in Physics，2023，10：1070284.

[14] Zhao X，Zheng Z，Liu L，et al. Fast，long-scan-range pump-probe measurement based on asynchronous sampling using a dual-wavelength mode-locked fiber laser[J]. Optics Express，2012，20(23)：25584-25589.

[15] Chen H，Jiang X，Xu S，et al. Recent progress in multi-wavelength fiber lasers：principles，status，and challenges [J]. Chinese Optics Letters，2020，18(4)：041405.

[16] Guo B，Yao Y，Yan P G，et al. Dual-wavelength soliton mode-locked fiber laser with a WS_2-based fiber taper [J]. IEEE Photonics Technology Letters，2016，28(3)：323-326.

[17] Ahmad H，Danial Azam A，Zharif Samion M，et al. S-band Mode-locked Thulium-doped fluoride fiber laser using $FePS_3$ as saturable absorber [J]. Optical Fiber Technology，2022，72：102985.

[18] Bao Q，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] Hui Z，Bu X，Wang Y，et al. Bi_2O_2Te nanosheets saturable absorber-based passive mode-locked fiber laser：from soliton molecules to harmonic soliton [J]. Advanced Optical Materials，2022，10(24)：2201812.

[20] Ahmad H，Salim M M，Thambiratnam K，et al. A black phosphorus-based tunable Q-switched ytterbium fiber laser[J]. Laser Physics Letters，2016，13(9)：095103.

[21] Wang K，Feng Y，Chang C，et al. Broadband ultrafast nonlinear absorption and nonlinear refraction of layered molybdenum dichalcogenide semiconductors [J]. Nanoscale，2014，6(18)：10530-10535.

[22] Ge Y，Zhu Z，Xu Y，et al. Broadband nonlinear photoresponse of 2D TiS_2 for ultrashort pulse generation and all-optical thresholding devices [J]. Advanced Optical Materials，2018，6(4)：1701166.

[23] Shang X，Guo L，Zhang H，et al. Passive mode-locked Er-doped fiber laser pulse generation based on titanium disulfide saturable absorber [J]. Frontiers of Information Technology

& Electronic Engineering, 2021, 22(5): 756-766.

[24] Sharma S, Singh S, Singh R C, et al. Structural transformation and room temperature ammonia sensing properties of TiS_2 nanostructures[J]. SN Applied Sciences, 2020, 2(5): 887.

[25] Jhon Y I, Lee J, Jhon Y M, et al. Ultrafast mode-locking in highly stacked $Ti_3C_2T_x$ MXenes for 1.9- μm infrared femtosecond pulsed lasers[J]. Nanophotonics, 2021, 10(6): 1741-1751.

[26] 蒋 彬, 丁宇龙, 赵福利, 等. 拉曼光谱在二维材料研究上的应用[J]. 物理与工程, 2022, 32(6): 24-33.
Jiang Bin, Ding Yulong, Zhao Fuli, et al. Application of Raman spectroscopy in the characterization of two-dimensional materials[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(6): 24-33.

[27] Shi Y, Yang X, Huo Y, et al. Raman spectroscopic determination of the bandgap for layered (Mo, W)-(S_2, Se_2)[J]. Physics Letters A, 2025, 542: 130427.

[28] 肖 萍, 郑少波, 尤静林, 等. 钛氧化物结构及其拉曼光谱表征[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(5): 936-939.
Xiao Ping, Zheng Shaobo, You Jinglin, et al. Structure and Raman spectra of titanium oxides [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(5): 936-939.

[29] 周伟杰, 纳全鑫, 王 瑀, 等. 亚纳秒脉宽的Tm: $GdVO_4$被动锁模激光器[J]. 中国激光, 2023, 50(22): 30-35.
Zhou Weijie, Na Quanxin, Wang Yu, et al. Passively mode-locked Tm: $GdVO_4$ laser with sub-nanosecond pulse width[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(22): 30-35.

[30] Zhang H, Lu S B, Zheng J, et al. Molybdenum disulfide (MoS_2) as a broadband saturable absorber for ultra-fast photonics[J]. Optics Express, 2014, 22(6): 7249-7260.

[31] Fan W, Han Y, Chen S, et al. Nanosized indium selenide saturable absorber for multiple solitons operation in Er(3+)-doped fiber laser[J]. Optics Express, 2023, 31(6): 10176-10190.

[32] Du Y, Han M, Cheng P, et al. Pulsating soliton with broadened Kelly sidebands in an ultrafast fiber laser [J]. Optics Letters, 2019, 44(16): 4087-4090.

[33] Hu Q, Li M, Li P, et al. Dual-wavelength passively mode-locked Yb-doped fiber laser based on a $SnSe_2$-PVA saturable absorber [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(4): 1503413.

[34] Jiang K, Wu Z, Fu S, et al. Switchable dual-wavelength mode-locking of thulium-doped fiber laser based on SWNTs[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(19): 2019-2022.

[35] He J, Lu H, Tao L, et al. Novel two-dimensional semi-metallic $NiTe_2$ based saturable absorber for ultrafast mode-locked fiber laser[J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 123: 104195.

[36] Guo B, Li S, Fan Y, et al. Versatile soliton emission from a WS2 mode-locked fiber laser[J]. Optics Communications, 2018, 406: 66-71.

[37] Ai F, Li X, Qian J. Dual-wavelength mode-locked fiber laser based on graphene materials [J]. The European Physical Journal Special Topics, 2022, 231(4): 643-649.

作者简介:

黄天宇(1998—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器方向的研究;

常建华(1976—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光电传感器、超快激光器、光电混合集成等方面的研究。