

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

TiCN作为可饱和吸收体的2.8 μm 被动调Q锁模光纤激光器

叶珊珊, 黄海波, 陈颂元, 陶俊哲, 文字轩, 高伟清

引用本文:

叶珊珊, 黄海波, 陈颂元, 等. TiCN作为可饱和吸收体的2.8 μm 被动调Q锁模光纤激光器[J]. 光电工程, 2023, 50(7): 230107.

Ye S S, Huang H B, Chen S Y, et al. 2.8 μm passively Q-switched mode-locked fiber laser using TiCN as saturable absorber[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(7): 230107.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.230107>

收稿日期: 2023-05-09; 修改日期: 2023-07-30; 录用日期: 2023-08-07

相关论文

可调谐纳秒脉冲锁模光纤激光器

刘宇星, 姜盼秋, 汪平河

光电工程 2021, 48(9): 210195 doi: 10.12086/oe.2021.210195

多模光纤作可饱和吸收体的锁模光纤激光器

洪瑶, 张靓, 纪海莹, 孙梦茹, 王天枢

光电工程 2021, 48(5): 200362 doi: 10.12086/oe.2021.200362

高亮度蓝光半导体激光器光纤耦合技术

段程芮, 赵鹏飞, 王旭葆, 林学春

光电工程 2021, 48(5): 200372 doi: 10.12086/oe.2021.200372

基于模式耦合器的锁模掺镱光纤激光器

尧涵, 石帆, 黄译平, 王腾, 曾祥龙

光电工程 2020, 47(11): 200040 doi: 10.12086/oe.2020.200040

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



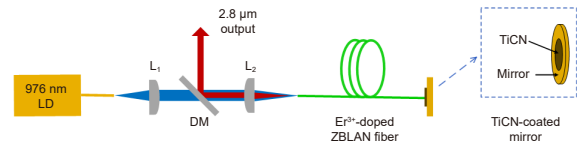
OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2023.230107

TiCN 作为可饱和吸收体的 2.8 μm 被动调 Q 锁模 光纤激光器



叶珊珊[†], 黄海波[†], 陈颂元, 陶俊哲,
文字轩, 高伟清*

合肥工业大学物理学院光学工程系, 安徽 合肥 230601

摘要: 本文报道了一种基于材料可饱和吸收的 2.8 μm 被动调 Q 锁模掺铒氟化物光纤激光器。通过将 TiCN 颗粒作为可饱和吸收体直接涂覆于反射腔镜, 并结合氟化物光纤垂直端面的输出耦合, 实现了具有较低激光阈值和紧凑腔结构的 2.8 μm 脉冲光纤激光器。该激光器在泵浦功率达到 330 mW 时, 开始出现调 Q 锁模脉冲。随着泵浦功率持续增大, 调 Q 脉冲包络重复频率从 14.34 kHz 增加至 32.57 kHz, 对应的脉冲宽度从 10.51 μs 减小至 5.40 μs 。在 650 mW 的泵浦功率下, 获得最大平均输出功率 25.83 mW, 斜率效率为 7.2%。

关键词: 中红外激光; 掺铒氟化物光纤; 可饱和吸收体; 被动调 Q 锁模

中图分类号: O432.1+2

文献标志码: A

叶珊珊, 黄海波, 陈颂元, 等. TiCN 作为可饱和吸收体的 2.8 μm 被动调 Q 锁模光纤激光器 [J]. 光电工程, 2023, 50(7): 230107

Ye S S, Huang H B, Chen S Y, et al. 2.8 μm passively Q-switched mode-locked fiber laser using TiCN as saturable absorber[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(7): 230107

2.8 μm passively Q-switched mode-locked fiber laser using TiCN as saturable absorber

Ye Shanshan[†], Huang Haibo[†], Chen Songyuan, Tao Junzhe, Wen Yuxuan, Gao Weiqing*

Department of Optical Engineering, School of Physics, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230601, China

Abstract: A 2.8 μm passively Q-switched mode-locked erbium-doped fluoride fiber laser based on material saturable absorption is reported in this paper. By depositing TiCN particles directly onto the cavity mirror as the saturable absorber and using the vertical cleaved end of the fluoride fiber as an output coupler, the 2.8 μm pulsed fiber lasing with a low laser threshold and a compact cavity structure is realized. When the pump power reaches 330 mW, the Q-switched mode-locked pulses begin to appear. With the increase of pump power, the repetition frequency of Q-switched pulse envelope increases from 14.34 to 32.57 kHz, and the pulse width decreases from 10.51 to 5.40 μs . Under the pump power of 650 mW, the maximum average output power of 25.83 mW is obtained,

收稿日期: 2023-05-09; 修回日期: 2023-07-30; 录用日期: 2023-08-07

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB2903102); 安徽省重点研发计划项目 (号 202104a07020010); 国家自然科学基金项目 (61875052, 62105087, 62105088, 61905059, 12204141); 安徽省自然科学基金项目 (2108085QF282, 1908085QF273); 国家级大学生创新创业训练计划项目 (202110359079)

*通信作者: 高伟清, gaoweiqing@hfut.edu.cn。

†同等贡献作者

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

and the slope efficiency is about 7.2%.

Keywords: mid-infrared laser; erbium-doped fluoride fiber; saturable absorber; passively Q-switched mode-locked

1 引言

3 μm 波段的中红外 (mid-infrared, MIR) 激光因其波长覆盖了大气中水分子和许多重要气体分子的吸收峰而广泛应用于生物医学、材料加工、光谱学和大气遥感等领域^[1-7]。为了产生 MIR 脉冲激光, 主动调 Q 和锁模技术通常需要在谐振腔中使用电光调制器或声光调制器等元器件^[8-10], 可以实现较高的单脉冲能量和可调的脉冲重复频率, 但不可避免地导致复杂结构和较高成本。为了构成紧凑型光纤激光器, 使用可饱和吸收体 (saturable absorber, SA) 的被动方法在 MIR 脉冲激光的产生中发挥着重要作用^[11-14]。目前较为常用的可饱和吸收器件是半导体可饱和吸收镜 (semiconductor saturable absorption mirror, SESAM), 然而, 由于制造工艺复杂和价格昂贵, SESAM 在中红外波段的应用受到一定的限制。相比于传统 SA, 二维 (2D) 材料表现出优异的光学特性, 包括高光学非线性系数、超快载流子动力学和宽带饱和吸收^[15], 因而 2D 材料作为 SA 在 MIR 脉冲激光器中的应用吸引了越来越多的关注^[16-22]。

随着 2D 材料的快速发展, 以石墨烯^[23]、拓扑绝缘体^[24]、黑磷^[25-26]、碳纳米管^[27] 和过渡金属硫化物^[28] 为代表的 SA 材料已被成功应用于 MIR 波段。近年来, 由前期过渡金属碳化物或碳氮化物组成的一系列新的 2D 材料 MXene 引起了广泛关注^[29]。MXene 材料的通式为 $M_{n+1}X_nT_x$ ($n=1\sim 3$), 其中 M 表示前期过渡金属 (如 Sc、Ti、Zr、V、Nb、Cr 或 Mo), T 通常表示来自第三或第四主族的元素, X 表示 C 或 N^[30]。目前, 这类材料在储能、电磁干扰屏蔽、水净化、化学催化剂和生物传感器等领域的应用逐渐成熟^[31-33]。MXene 已被发现表现出非线性可饱和吸收特性, 在较高的光通量下具有增加的透射率^[34], $Ti_3C_2T_x$ 在脉冲光纤激光器中的工作性能也得到证实^[35]。碳氮化钛 (TiCN) 属于钛基复合材料 (TMCs)^[36], 它具有高熔点、良好的热稳定性、良好的化学稳定性以及优异的导电性和导热性, 因此被应用于微波吸收剂、保护涂层和耐火材料等领域^[37-39]。在 2 μm 波段, TiCN 作为 SA 可实现高次谐波锁模, 获得最大重复频率为 444.1 MHz 的锁

模脉冲^[40]。然而, 据我们所知, TiCN 在 3 μm 波段脉冲激光产生中的应用潜力尚未得到研究。

在本文工作中, 通过将 TiCN 颗粒作为 SA 直接涂覆于反射腔镜, 实现了 2.8 μm 波段被动调 Q 锁模 (Q-switched mode-locked, QSML) 掺铒氟化物光纤激光器。该激光器阈值泵浦功率为 330 mW, QSML 脉冲重复频率最大值为 32.57 kHz, 对应的脉冲宽度为 5.40 μs 。在 650 mW 的泵浦功率下, 获得最大平均输出功率 25.83 mW, 斜率效率为 7.2%。基于 TiCN 在 2.8 μm 波段所表现出的可饱和吸收特性, 结合弱反馈谐振腔结构的设计, 本工作实现了具有低激光阈值和紧凑结构的 MIR 脉冲光源。

2 实验方案与装置

2.1 TiCN 可饱和吸收体的制备与特性分析

通过直接将 TiCN 材料涂覆在反射镜上, 完成了基于 TiCN 的空间可饱和吸收体的制备, 具体流程如下: 首先将 TiCN 颗粒 (50 mg) 与聚乙烯醇 (50 mg) 混合并加入蒸馏水 (10 mL) 中; 随后, 将该混合液放入超声振荡仪中振荡 2 小时以去除大块的 TiCN 颗粒; 取出振荡后的混合液静置 20 分钟后, 取其上层悬浮液并再次进行超声振荡处理, 重复此操作, 直至混合液长时间静置也不会产生沉淀; 最后, 通过旋涂的方式 (转速为 1000 rpm) 将适量的 TiCN 悬浮液均匀地沉积到反射镜上, 等待其自然干燥后, 沉积 TiCN 的反射镜便制备完成。

图 1(a) 显示了 TiCN 颗粒的透射电子显微镜 (transmission electron microscope, TEM) 图像, 其横向尺寸约为 500 nm。图 1(b) 所示为 TiCN 颗粒的高分辨率透射电子显微镜 (high-resolution transmission electron microscope, HRTEM) 图像, 晶格条纹间距约为 4.0 \AA ($1 \text{\AA}=10^{-10} \text{ m}$)。TiCN 在 2 μm 波段的非线性吸收特性在我们之前的工作中已进行了实验测量, 通过非线性传输数据和拟合曲线验证了其可饱和吸收特性^[40]。结果表明, TiCN 沉积的可饱和吸收器件在 1930 nm 处的调制深度为 6.76%, 饱和功率为 1.83 kW。根据饱和吸收理论, 介质的吸收系数 α 与光强 I 之间的关系可以表示为^[41]

$$\alpha(I) = \frac{\alpha_0}{1 + I/I_{\text{sat}}}, \quad (1)$$

其中, α_0 是介质的线性吸收系数。 I_{sat} 是饱和强度, 它取决于介质的性质, 可以表示为

$$I_{\text{sat}} = \frac{h\omega}{\sigma_0\tau}, \quad (2)$$

其中: ω 是入射光子的频率, σ_0 表示吸收截面, τ 是粒子的弛豫时间。根据 TiCN 在 2 μm 波段的非线性吸收数据^[40], 结合式 (1) 和式 (2) 进行计算可以得到, TiCN 在 2.8 μm 处的饱和功率值约为 1.26 kW。由于缺乏合适的 2.8 μm 脉冲光源, 我们难以对 TiCN 在 2.8 μm 的可饱和吸收特性展开实验测量。

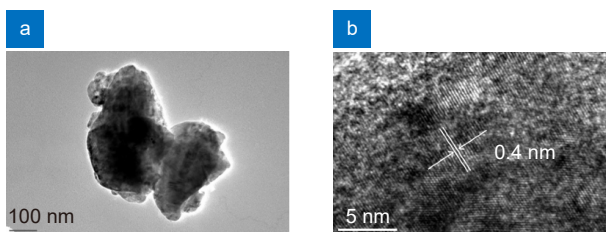


图 1 (a) TiCN 的 TEM 图像; (b) HRTEM 下的 TiCN 晶格条纹

Fig. 1 (a) TEM image of TiCN; (b) Lattice fringes of TiCN under an HRTEM

2.2 实验装置

TiCN 作为 SA 的被动 QSML 掺铒氟化物光纤激光器的实验装置如图 2 所示。泵浦源是一个商用 976 nm 半导体激光器 (laser diode, LD), 输出尾纤的芯径为 200 μm , 数值孔径为 0.22。所使用的氟化物光纤是一段长度为 3.3 m 的高掺杂 (7 mol%) 双包层 Er³⁺: ZBLAN 光纤 (Le Verre Fluoré), 纤芯直径为 15 μm , 数值孔径为 0.12, 光纤的内包层为 240 μm × 260 μm 双截圆形。Er³⁺ 位于纤芯中, 双截圆形的内包层结构可有效提高泵浦光与纤芯的交叠程度, 保证泵浦吸收的高效性。使用一对焦距均为 50 mm 的 CaF₂ 透镜 L₁ 和 L₂ (Thorlabs, LB5766) 将 976 nm 泵浦光耦合进入

Er³⁺: ZBLAN 光纤中, 在两个透镜 (L₁ 和 L₂) 之间以 45° 角放置了一个二向色镜 (dichroic mirror, DM), 该二向色镜在 976 nm 处的透射率高于 95%, 在 2.8 μm 附件的反射率高于 95%。对 Er³⁺: ZBLAN 光纤的左端进行垂直切割的处理, 将其作为输出耦合端为谐振腔提供弱反馈。由于 Er³⁺: ZBLAN 光纤的纤芯在 2.8 μm 处的折射率为 1.4943, 可以计算得到此端面的菲涅耳反射率约为 3.9%。沉积 TiCN 的反射镜则被放置在 Er³⁺: ZBLAN 光纤的另一端, 将其作为调 Q 器件的同时也用于提供另一侧的谐振腔反馈。

输出激光的平均输出功率由光功率计进行记录, 时域脉冲信号由响应时间小于 3 ns 的 HgCdTe 检测器 (Vigo System, PCI-2TE-12) 捕获, 并将其连接至 2 GHz 带宽的数字示波器。频谱由带宽为 26 GHz 的射频频谱分析仪 (Keysight, N9000B) 测量, 激光光谱则由最高测量精度为 4 cm⁻¹ 的傅里叶变换光谱仪 (Arcoptix, FT-IR Rocket) 进行记录。

3 实验结果与讨论

首先, 通过调整 TiCN 沉积反射镜的位置使平均输出功率达到最大。随后, 持续增加泵浦光功率, 对光纤激光器的输出特性随发射泵浦功率的变化情况进行了观察和记录。如图 3(a-d) 所示为不同泵浦功率下测量的 QSML 脉冲序列示波器轨迹。可以看出, 在泵浦功率达到 330 mW 时, 开始出现 QSML 脉冲。随着泵浦功率的持续增大, QSML 脉冲包络的重复频率保持单调增加的趋势。随着泵浦功率从 330 mW 持续增加至 500 mW, QSML 脉冲包络重复频率从 14.34 kHz 增大至 32.57 kHz, 对应的脉冲宽度则从 10.51 μs 降低至 5.40 μs 。

如图 4(a) 所示为 QSML 脉冲包络的重复频率与脉宽随泵浦功率的变化情况, 可以明显看到, 在 330~500 mW 泵浦功率区间内, QSML 脉冲的重复频率呈现逐渐增加的趋势, 而脉冲宽度则表现为单调下

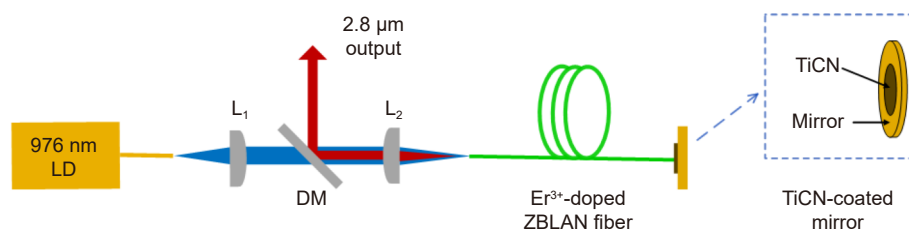


图 2 TiCN 作为 SA 的被动 QSML 掺铒氟化物光纤激光器实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of the passively QSML Er³⁺-doped fluoride fiber laser using TiCN as the saturable absorber

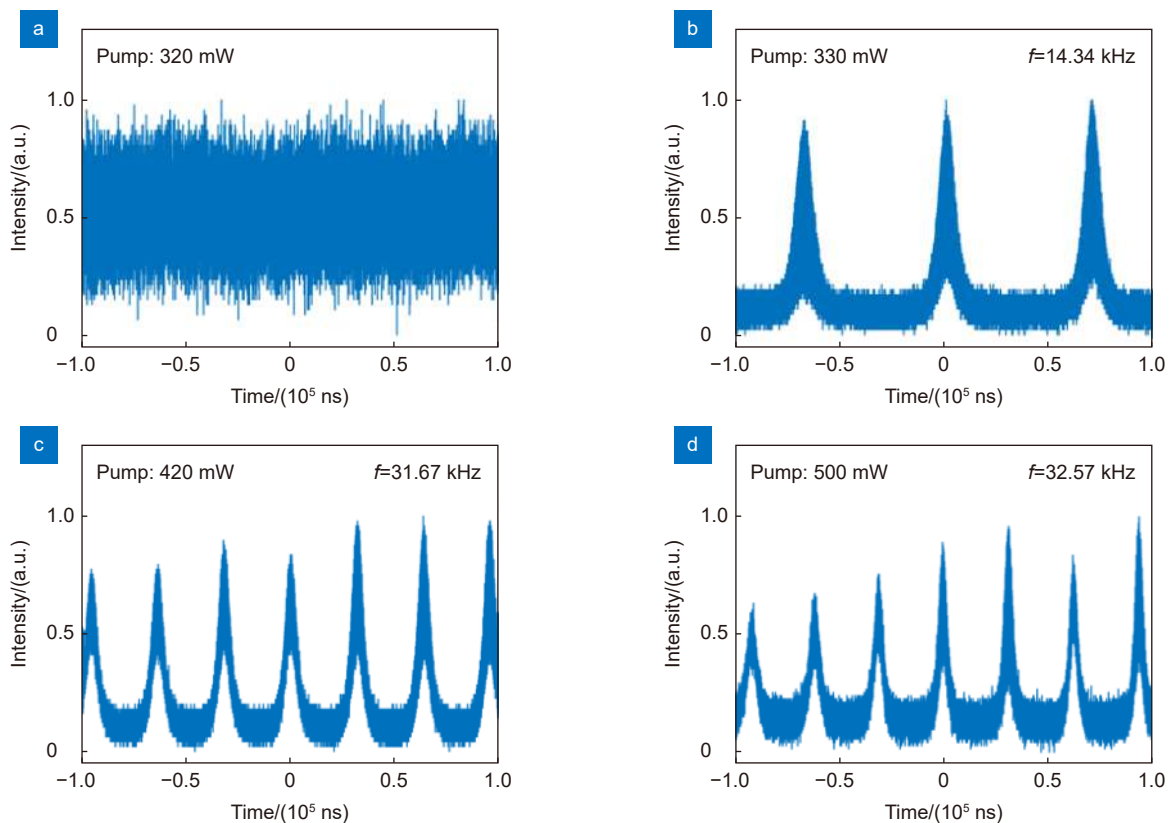


图 3 不同泵浦功率下 QSML 脉冲序列的示波器轨迹。(a) 泵浦功率 320 mW; (b) 泵浦功率 330 mW; (c) 泵浦功率 420 mW; (d) 泵浦功率 500 mW

Fig. 3 Oscilloscope traces of the QSML pulse trains measured under different pump power. (a) Pump power of 320 mW; (b) Pump power of 330 mW; (c) Pump power of 420 mW; (d) Pump power of 500 mW

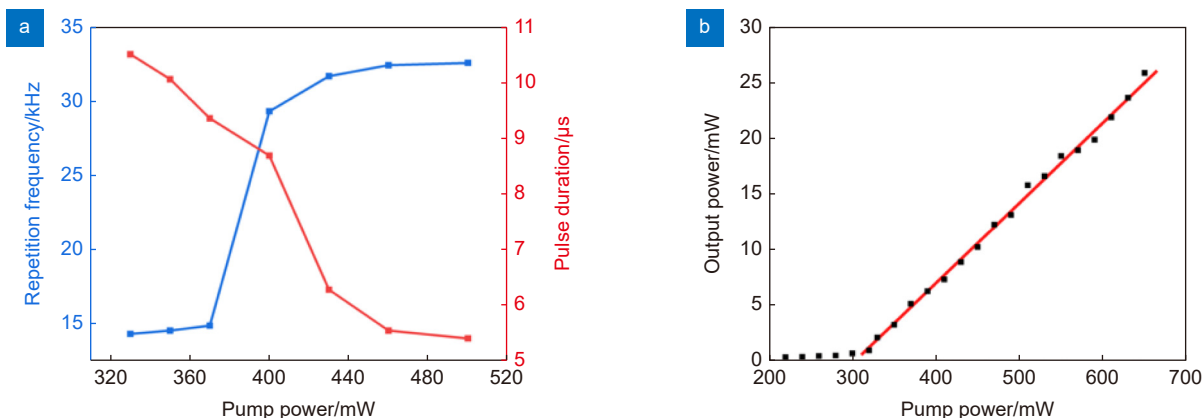


图 4 (a) QSML 脉冲包络重复频率与持续时间随泵浦功率的变化关系; (b) 平均输出功率随泵浦功率的变化关系

Fig. 4 (a) The repetition frequency and pulse duration of QSML pulse envelope as a function of pump power; (b) The average output power as a function of pump power

降的趋势,这也与传统被动调 Q 光纤激光器的典型特征一致。然而,当泵浦功率达到 520 mW 以上时,这种变化趋势开始难以维持。我们认为,这可能是因为在较高的功率水平下, TiCN 接近“漂白”状态,下能级可吸收信号光的粒子较少,另外反射镜表面沉积

的 TiCN 可饱和吸收材料受到热效应的影响,导致调制作用开始减弱。考虑到保护沉积 TiCN 的反射镜及相关器件,实验中没有对高功率状态下的脉冲特性做进一步的研究。在 650 mW 的泵浦功率下测得最大平均输出功率为 25.83 mW,对应的斜率效率为 7.2%,

如图 4(b) 所示。

在实验中, 调 Q 脉冲包络内部的锁模子脉冲稳定出现且重复频率不随泵浦功率的增加发生变化。实验中也分别在不同泵浦功率水平下对锁模子脉冲的示波器轨迹进行了记录, 如图 5(a) 和图 5(b) 所示。腔内锁模脉冲的时间间隔可以根据谐振腔长度进行计算 ($\tau=2nL/c$)。根据激光器的腔长为 3.3 m, 计算得到锁模脉冲的时间间隔应为 34 ns, 这与实验测量的结果吻合。如图 5(c) 所示为泵浦功率为 500 mW 时测得的 QSML 脉冲的光谱图, 脉冲激光的中心波长位于 2778 nm, 光谱宽度为 3.7 nm。如图 5(d) 所示则是在 500 mW 泵浦功率、8 kHz 分辨率带宽条件下测得的锁模子脉冲的 RF 频谱图, 锁模子脉冲的基频中心为 28.6 MHz, 与图 4(b) 所示的相邻脉冲间的时间间隔能够很好地对应。假设锁模子脉冲为 sech^2 型脉冲, 则可计算得到其傅里叶变换极限脉宽约为 2.19 ps。由于缺乏合适的自相关仪, 实验中没有对实际锁模子脉冲宽度进行测量。

在实验过程中并未观测到稳定的连续锁模脉冲产生。要实现稳定的连续锁模脉冲, 应满足以下稳定性条件^[42]:

$$E_p^2 > E_{\text{sat,L}} E_{\text{sat,A}} \Delta R, \quad (3)$$

式中: E_p 为腔内脉冲能量, $E_{\text{sat,L}}$ 为增益光纤的饱和能量, $E_{\text{sat,A}}$ 为可饱和吸收体的饱和能量, ΔR 为可饱和吸收体的调制深度。根据式 (3) 可知, 较大的腔内脉冲能量、增益光纤和 SA 较小的饱和能量以及较低的 SA 调制深度将有利于满足连续锁模脉冲的稳定条件。因此, 在本实验中未能产生连续锁模脉冲的原因可能有: 1) SA 的调制深度不能满足锁模的启动; 2) 连续锁模产生的阈值大于 SA 的损伤阈值, 导致 SA 先一步受到热损伤; 3) SA 的非饱和损耗可能是导致谐振腔内脉冲能量 E_p 相对较低的原因, 因此难以满足连续锁模的启动条件。针对上述几点限制因素, 未来可以通过使用具有更高增益的掺杂光纤或者进一步优化 SA 的制备过程和沉积方法加以解决, 有望实现更优的锁模脉冲特性。

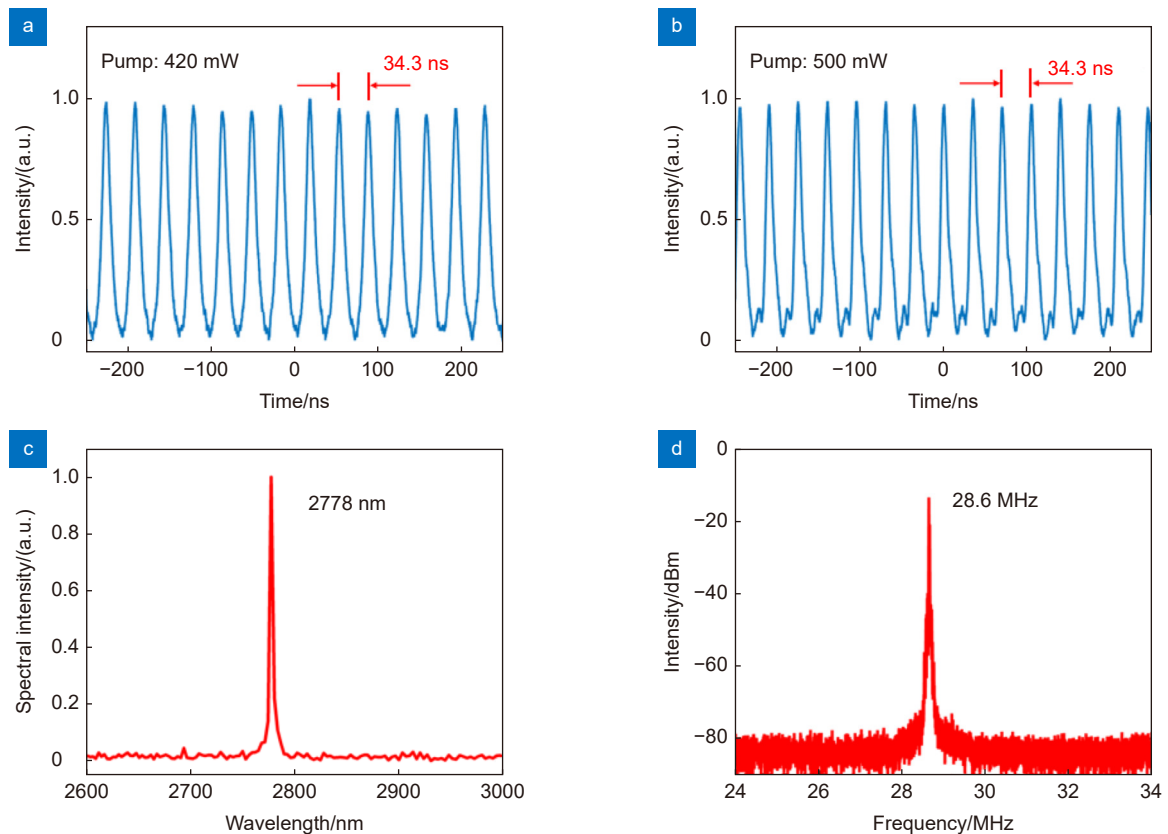


图 5 (a-b) 不同泵浦功率下锁模脉冲序列的示波器轨迹; (c) 泵浦功率为 500 mW 时的 QSML 脉冲光谱图; (d) 泵浦功率为 500 mW 时的 QSML 脉冲频谱图

Fig. 5 (a-b) Oscilloscope traces of the mode-locked pulse trains under different pump power; (c) The spectrum of the QSML pulses under the pump power of 500 mW; (d) The radio-frequency spectrum of the QSML pulses under the pump power of 500 mW

4 结 论

通过将沉积 TiCN 的反射镜作为可饱和吸收体, 本文实现了具有低阈值和紧凑腔结构的 2.8 μm 被动调 Q 锁模掺铒氟化物光纤激光器。该激光器在泵浦功率达到 330 mW 时, 开始出现调 Q 锁模脉冲。随着泵浦功率的持续增大, 调 Q 脉冲包络重复频率从 14.34 kHz 增加至 32.57 kHz, 对应的脉冲宽度则从 10.51 μs 减小至 5.40 μs 。调 Q 包络内部的锁模子脉冲重复频率为 28.6 MHz, 光谱中心波长位于 2778 nm。在 650 mW 的泵浦功率下, 该激光器获得最大平均输出功率 25.83 mW, 对应的斜率效率为 7.2%。结果表明, TiCN 可以作为一种稳定的可饱和吸收材料, 应用于 MIR 波段激光脉冲的产生。

参考文献

- [1] Edwards G S. Mechanisms for soft-tissue ablation and the development of alternative medical lasers based on investigations with mid-infrared free-electron lasers[J]. *Laser Photon Rev*, 2009, 3(6): 545–555.
- [2] Mackanos M A, Simanovskii D M, Schriver K E, et al. Pulse-duration-dependent mid-infrared laser ablation for biological applications[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2012, 18(4): 1514–1522.
- [3] Zhu X S, Zhu G W, Wei C, et al. Pulsed fluoride fiber lasers at 3 μm [Invited][J]. *J Opt Soc Am B*, 2017, 34(3): A15–A28.
- [4] Frayssinous C, Fortin V, Bérubé J P, et al. Resonant polymer ablation using a compact 3.44 μm fiber laser[J]. *J Mater Process Technol*, 2018, 252: 813–820.
- [5] Hodgkinson J, Tatam R P. Optical gas sensing: a review[J]. *Meas Sci Technol*, 2013, 24(1): 012004.
- [6] Vainio M, Merimaa M, Halonen L. Frequency-comb-referenced molecular spectroscopy in the mid-infrared region[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(21): 4122–4124.
- [7] Baranwal N, Mahulikar S P. Review of Infrared signature suppression systems using optical blocking method[J]. *Def Technol*, 2019, 15(3): 432–439.
- [8] Tokita S, Murakami M, Shimizu S, et al. 12 W Q-switched Er: ZBLAN fiber laser at 2.8 μm [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(15): 2812–2814.
- [9] Li J F, Hu T, Jackson S D. Dual wavelength Q-switched cascade laser[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(12): 2208–2210.
- [10] Frerichs C, Tauermaun T. Q-switched operation of laser diode pumped erbium-doped fluorozirconate fibre laser operating at 2.7 μm [J]. *Electron Lett*, 1994, 30(9): 706–707.
- [11] Tang P H, Qin Z P, Liu J, et al. Watt-level passively mode-locked Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser at 2.8 μm [J]. *Opt Lett*, 2015, 40(21): 4855–4858.
- [12] Wang J T, Wei J C, Liu W J, et al. 2.8 μm passively Q-switched Er: ZBLAN fiber laser with an Sb saturable absorber mirror[J]. *Appl Opt*, 2020, 59(29): 9165–9168.
- [13] Paradis P, Boilard T, Fortin V, et al. Dysprosium-doped silica fiber as saturable absorber for mid-infrared pulsed all-fiber lasers[J]. *Opt Express*, 2022, 30(3): 3367–3378.
- [14] Bharathan G, Xu L Y, Jiang X T, et al. MXene and PtSe₂ saturable absorbers for all-fibre ultrafast mid-infrared lasers[J]. *Opt Mater Express*, 2021, 11(7): 1898–1906.
- [15] Woodward R I, Kelleher E J R. 2D saturable absorbers for fibre lasers[J]. *Appl Sci*, 2015, 5(4): 1440–1456.
- [16] Wei C, Zhu X S, Norwood R A, et al. Passively Q-switched 2.8- μm nanosecond fiber laser[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(19): 1741–1744.
- [17] Qin Z P, Hai T, Xie G Q, et al. Black phosphorus Q-switched and mode-locked mid-infrared Er: ZBLAN fiber laser at 3.5 μm wavelength[J]. *Opt Express*, 2018, 26(7): 8224–8231.
- [18] Lü Y J, Wei C, Zhang H, et al. Wideband tunable passively Q-switched fiber laser at 2.8 μm using a broadband carbon nanotube saturable absorber[J]. *Photon Res*, 2019, 7(1): 14–18.
- [19] Li Q R, Wei C, Chi H, et al. Au nanocages saturable absorber for 3- μm mid-infrared pulsed fiber laser with a wide wavelength tuning range[J]. *Opt Express*, 2019, 27(21): 30350–30359.
- [20] Luo H Y, Li S Q, Wu X D, et al. Unlocking the ultrafast potential of gold nanowires for mode-locking in the mid-infrared region[J]. *Opt Lett*, 2021, 46(7): 1562–1565.
- [21] Qin Z P, Xie G Q, Zhang H, et al. Black phosphorus as saturable absorber for the Q-switched Er: ZBLAN fiber laser at 2.8 μm [J]. *Opt Express*, 2015, 23(19): 24713–24718.
- [22] Shakaty A A, Hmood J K, Mahdi B R, et al. Passively mode-locked erbium-doped fiber laser based on a nanodiamond saturable absorber[J]. *Appl Opt*, 2022, 61(14): 4047–4054.
- [23] Zhu G W, Zhu X S, Wang F Q, et al. Graphene mode-locked fiber laser at 2.8 μm [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2016, 28(1): 7–10.
- [24] Li J F, Luo H Y, Wang L L, et al. 3- μm mid-infrared pulse generation using topological insulator as the saturable absorber[J]. *Opt Lett*, 2015, 40(15): 3659–3662.
- [25] Chen Y, Jiang G B, Chen S Q, et al. Mechanically exfoliated black phosphorus as a new saturable absorber for both Q-switching and mode-locking laser operation[J]. *Opt Express*, 2015, 23(10): 12823–12833.
- [26] Qin Z P, Xie G Q, Ma J G, et al. 2.8 μm all-fiber Q-switched and mode-locked lasers with black phosphorus[J]. *Photon Res*, 2018, 6(11): 1074–1078.
- [27] Set S Y, Yaguchi H, Tanaka Y, et al. Ultrafast fiber pulsed lasers incorporating carbon nanotubes[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2004, 10(1): 137–146.
- [28] Wei C, 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 Phys Lett*, 2016, 13(10): 105108.
- [29] Naguib M, Mochalin V N, Barsoum M W, et al. 25th anniversary article: MXenes: a new family of two-dimensional materials[J]. *Adv Mater*, 2014, 26(7): 992–1005.
- [30] Naguib M, Kurtoglu M, Presser V, et al. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti₃AlC₂[J]. *Adv Mater*, 2011, 23(37): 4248–4253.
- [31] Okubo M, Sugahara A, Kajiyama S, et al. MXene as a charge storage host[J]. *Acc Chem Res*, 2018, 51(3): 591–599.
- [32] Wang X F, Kajiyama S, Iinuma H, et al. Pseudocapacitance of MXene nanosheets for high-power sodium-ion hybrid capacitors[J]. *Nat Commun*, 2015, 6(1): 6544.
- [33] Ran J R, Gao G P, Li F T, et al. Ti₃C₂ MXene co-catalyst on metal sulfide photo-absorbers for enhanced visible-light photocatalytic hydrogen production[J]. *Nat Commun*, 2017, 8(1): 13907.

- [34] Dong Y C, Chertopalov S, Maleski K, et al. Saturable absorption in 2D Ti_3C_2 MXene thin films for passive photonic diodes[J]. *Adv Mater*, 2018, **30**(10): 1705714.
- [35] Jiang X T, Liu S 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 Photon Rev*, 2018, **12**(2): 1700229.
- [36] Izui H, Hattori K, Komiya Y. Dry sliding wear resistance characterization of titanium matrix composites reinforced with titanium carbonitrides[J]. *Mech Eng J*, 2020, **7**(5): 20-00029.
- [37] Akinribide O J, Obadele B A, Akinwamide S O, et al. Sintering of binderless TiN and TiCN-based cermet for toughness applications: processing techniques and mechanical properties: a review[J]. *Ceram Int*, 2019, **45**(17): 21077-21090.
- [38] Zhou Y L, Wang N, Qu X H, et al. Arc-discharge synthesis of nitrogen-doped C embedded TiCN nanocubes with tunable dielectric/magnetic properties for electromagnetic absorbing applications[J]. *Nanoscale*, 2019, **11**(42): 19994-20005.
- [39] Peyqambarian M, Azadi M, Ahangarani S. An evaluation of the effects of the N_2/Ar gas flux ratio on various characteristics of $TiC_{0.3}N_{0.7}$ nano-structure coatings on the cold work tool steel by pulsed DC-PACVD[J]. *Surf Coat Technol*, 2019, **366**: 366-374.
- [40] Ma X H, Liu S Q, Dai W W, et al. Application of TiCN on passively harmonic mode-locked ultrashort pulse generation at $2\mu m$ [J]. *Opt Laser Technol*, 2022, **150**: 107986.
- [41] Boyd R W. *Nonlinear Optics*[M]. 4th ed. New York: Academic Press, 2020.
- [42] Hönninger C, Paschotta R, Morier-Genoud F, et al. Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking[J]. *J Opt Soc Am B*, 1999, **16**(1): 46-56.

作者简介



叶珊珊(1998-), 女, 安徽黄山人, 硕士研究生, 主要从事中红外光纤激光器方面的研究。

E-mail: 2020111199@mail.hfut.edu.cn



黄海波(2000-), 男, 湖南桂东人, 在读本科生, 主要从事中红外光纤激光器方面的研究。

E-mail: 2019211811@mail.hfut.edu.cn



【通信作者】高伟清(1979-), 男, 安徽庐江人, 博士, 博士生导师, 主要从事光纤激光与非线性光纤光学方面的研究。

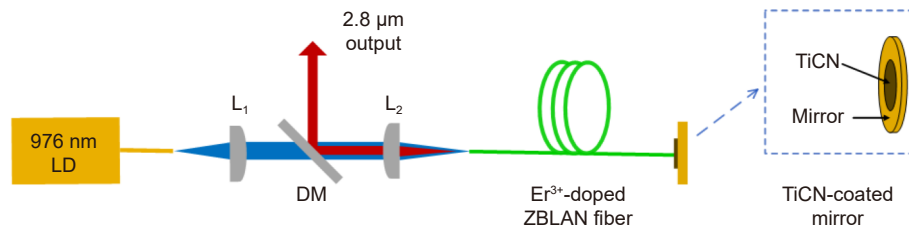
E-mail: gaoweiqing@hfut.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

2.8 μm passively Q-switched mode-locked fiber laser using TiCN as saturable absorber

Ye Shanshan[†], Huang Haibo[†], Chen Songyuan, Tao Junzhe, Wen Yuxuan, Gao Weiqing^{*}



Experimental setup of the passively Q-switched mode-locked Er^{3+} -doped fluoride fiber laser using TiCN as saturable absorber

Overview: Mid-infrared laser around $3 \mu\text{m}$ waveband is widely used in biomedicine, material processing, spectroscopy and atmospheric remote sensing because its wavelength covers the absorption peaks of water molecules and many important gas molecules in the atmosphere. In order to construct compact fiber lasers, passive methods using saturable absorbers play an important role in the generation of mid-infrared pulsed lasing. Compared with traditional saturable absorbers, two-dimensional materials exhibit excellent optical properties, including high optical nonlinearity, ultrafast carrier dynamics and broadband saturation absorption, so the application of two-dimensional materials as saturable absorbers in mid-infrared pulsed lasers has attracted more and more attention. Titanium carbonitride (TiCN) belongs to titanium matrix composite material, which has high melting point, good thermal stability, good chemical stability and excellent electrical and thermal conductivity. Recently, TiCN has been demonstrated to function as a saturable absorber in the $2 \mu\text{m}$ waveband to achieve high-order harmonic mode-locking.

In this paper, a $2.8 \mu\text{m}$ passively Q-switched mode-locked erbium-doped fluoride fiber laser based on material saturable absorption is reported. By depositing TiCN particles directly onto the cavity mirror as the saturable absorber and using the vertical cleaved end of the fluoride fiber as an output coupler, the $2.8 \mu\text{m}$ pulsed fiber laser with a low laser threshold and a compact cavity structure is realized. When the pump power reaches 330 mW , the Q-switched mode-locked pulses begin to appear. With the continuous increase of pump power, the repetition frequency of the Q-switched mode-locked pulse envelope keeps monotonically increasing, while the pulse width shows a monotonically decreasing trend. Specifically, when the pump power increases from 330 mW to 500 mW , the repetition frequency of the Q-switched mode-locked pulse envelope increases from 14.34 kHz to 32.57 kHz , and the corresponding pulse width decreases from $10.51 \mu\text{s}$ to $5.40 \mu\text{s}$. The mode-locked pulses inside the Q-switched pulse envelope appears stably and the repetition frequency does not show any change with the increase of pump power. The fundamental frequency of the mode-locked pulses is 28.6 MHz , and the central wavelength of the spectrum is 2778 nm . When the pump power is 650 mW , the maximum average output power of the laser reaches 25.83 mW , and the corresponding slope efficiency is about 7.2% . The results show that TiCN can be used as a stable saturable absorbent material for generating laser pulses in the mid-infrared waveband. It can be solved by using rare-earth ion doped fiber with higher gain and further optimizing the preparation process and deposition method of saturable absorber, which is expected to achieve the better mode-locked pulse characteristics.

Ye S S, Huang H B, Chen S Y, et al. $2.8 \mu\text{m}$ passively Q-switched mode-locked fiber laser using TiCN as saturable absorber[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(7): 230107; DOI: [10.12086/oe.2023.230107](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230107)

Foundation item: Project supported by the National Key R&D Program of China (2022YFB2903102), Anhui Provincial Key Research and Development Plan (202104a07020010), National Natural Science Foundation of China (61875052, 62105087, 62105088, 61905059, 12204141), Natural Science Foundation of Anhui Province (2108085QF282, 1908085QF273), and National Undergraduate Training Program for Innovation and Entrepreneurship (202110359079)

Department of Optical Engineering, School of Physics, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230601, China

* E-mail: gaoweiqing@hfut.edu.cn

[†]These authors contributed equally to this work.