

亚纳秒脉宽的 Tm:GdVO₄ 被动锁模激光器周伟杰¹, 纳全鑫^{1,2}, 王瑀¹, 许长文^{1*}, 范滇元¹¹深圳大学二维材料光电科技国际合作联合实验室, 广东 深圳 518060;²鹏城实验室, 广东 深圳 518060

摘要 报道了一种 1.85 μm 亚纳秒脉宽的 Tm:GdVO₄ 被动锁模激光器。通过使用商用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 和高透过率的输出耦合镜 (OCs), 实现了 Tm:GdVO₄ 短波段、亚纳秒脉宽的激光输出。对于连续波 (CW) 运转, 当使用透过率分别为 10%、20% 和 30% 的不同 OCs 时, 激光输出功率均超过 1 W, 在 1844、1850、1851、1861、1865 nm 波长上分别产生了激光振荡。对于连续波锁模 (CWML) 运转, 通过使用上述不同 OCs, 均实现了稳定的输出, 工作波长均位于 1851.6 nm 附近, 光谱宽度始终不高于光谱仪 0.05 nm 的分辨率, 输出脉宽分别为 474、752、651 ps。其中, 当使用透过率为 30% 的 OC 时, 可实现 320 mW 的最大平均输出功率。

关键词 激光器; 固体激光器; 被动锁模; 半导体可饱和吸收镜; 亚皮秒; 二极管泵浦激光器; Tm:GdVO₄ 激光器

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230527

1 引言

具有亚纳秒脉宽、高重复频率的锁模激光器在很多领域中都有重要的应用, 比如医疗美容、激光雷达测距、考古文物清理、光子晶体光纤超连续光谱拓展、非线性晶体激光调节 (高泵浦功率下降低激光损伤密度)、汽车发动机激光点火、中红外光学参量振荡器 (OPO) 等^[1-8]。

通常可以利用被动调 Q 的微芯片激光器或者主动锁模激光器来获得具有亚纳秒脉宽的激光脉冲^[9-16]。2013 年, Bhandari 等^[9]报道了被动调 Q 的 Nd:YAG/Cr:YAG 微芯片激光器, 得到了峰值功率为 13 MW、脉宽为 230 ps、重复频率为 100 Hz 的 1064 nm 激光输出。2015 年, Han 等^[10]报道了被动调 Q 的 Nd:YAG/Cr:YAG 微芯片激光器, 得到峰值功率为 32 kW、单脉冲能量为 29 μJ 的激光输出。2019 年, Lim 等^[11]报道了被动调 Q 的 Nd:YAG/Cr:YAG 陶瓷微芯片激光器, 得到了峰值功率为 27.7 MW、脉宽为 476 ps 的激光输出。2023 年, Rong 等^[12]报道了被动调 Q 的 Nd:LuAG 陶瓷微芯片激光器, 得到了脉宽为 489 ps、峰值功率为 45.49 kW 的 1064 nm 激光输出和脉宽为 556 ps、峰值功率为 22.91 kW 的 1053 nm 激光输出。2014 年, Mužik 等^[15]通过主动锁模, 使用 Tm:YLF 晶体获得了重复频率为 150 MHz、脉宽为 220 ps 和平均输出功率为 1.2 W 的 1.91 μm 激光。次年, 该团队获得了重复频率为

149.3 MHz、脉宽为 170 ps、平均输出功率为 2.6 W 的 1.91 μm 激光^[16]。其中, 主动锁模激光系统的重复频率约为 100 MHz 级别, 但需要声光或者电光调制器, 这会使得整个系统非常复杂繁琐; 被动调 Q 微芯片激光器可以实现高峰值功率, 但激光脉冲的重复频率仅为 kHz 左右。根据高斯脉冲时域和频率的关系 $\Delta\nu \times \Delta\tau \geq 0.441$ ($\Delta\tau$ 为脉冲宽度, $\Delta\nu$ 为锁模激光的频谱宽度) 可知, 变换极限下的脉冲宽度反比于光谱宽度, 因此在理论上具有窄激光光谱特性的被动锁模激光器可以获得亚 ns 宽度和高重复频率的激光脉冲输出。

近年来, 使用掺 Tm³⁺ 晶体作为增益介质的锁模激光器因其特殊性能而得到广泛研究^[17]。通过使用半导体可饱和吸收镜或单壁碳纳米管进行被动锁模, 已经能得到脉宽低于 100 fs 的掺 Tm³⁺ 激光器^[18-22]。然而, 具有亚 ns 脉宽特性的掺 Tm³⁺ 被动锁模激光器未见报道。Tm:GdVO₄ 晶体具有许多优良的性能, 其吸收波段比 Tm:YAG 和 Tm:YAP 更宽, 并且导热系数更大。Tm:GdVO₄ 晶体在 1.8 μm 处的发射截面大于 1.9 μm 处, 但由于短波段的重吸收效应更为严重, 当腔内没有加入波长控制器件时, 激光工作波长始终大于 1.9 μm^[23-27]。根据参考文献^[28], Tm:GdVO₄ 的激光输出波长将随着输出耦合镜 (OC) 透射率的增大而蓝移。与 1.9 μm 激光相比, 工作波长在 1.80~1.86 μm 处的激光的水吸收更少, 这能够有效减少水蒸气导致的激光功率衰减^[29]。在正常的大气条件下, 1.85 μm 激光比 1.9 μm

收稿日期: 2023-02-14; 修回日期: 2023-03-13; 录用日期: 2023-03-27; 网络首发日期: 2023-04-21

基金项目: 广东省自然科学基金(2019A1515111206)、深圳市科技计划项目(JCYJ20190808145016980)

通信作者: *chwxu@szu.edu.cn

激光更适合传输。

本文报道了 $1.85 \mu\text{m}$ 亚纳秒脉宽的 $\text{Tm}:\text{GdVO}_4$ 锁模激光运转。在实验中,通过使用半导体可饱和吸收镜(SESAM)实现了连续波锁模(CWML)运转;通过使用透过率分别为 10%、20% 和 30% 的不同输出耦合镜,实现了 474、752、651 ps 脉宽的激光输出。实验结果显示,锁模激光器的光谱宽度始终不高于光谱仪 0.05 nm 的分辨率。当使用透过率为 30% 的 OC 时,在 1851 nm 处能获得最大平均输出功率为 0.32 W 的激光输出。

2 实验设计

$\text{Tm}:\text{GdVO}_4$ 连续波锁模激光器的实验装置如图 1 所示。泵浦源是波长为 793 nm 的光纤耦合输出的激光二极管(LD),额定最大输出功率为 30 W,光纤数值孔径为 0.22,芯径为 $105 \mu\text{m}$ 。输入耦合透镜组由透镜 f_1 (焦距 $f=50 \text{ mm}$) 和 f_2 ($f=80 \text{ mm}$) 组成,经过耦合透镜组的转换, $\text{Tm}:\text{GdVO}_4$ 晶体中心的泵浦光斑直径约为 $168 \mu\text{m}$ 。使用尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的 $\text{Tm}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体[掺杂浓度(原子数分数)为 3%]作为增益介质,该晶体的两个表面都镀有对泵浦光和激光波长增透(AR)的膜,晶体由铜箔包裹,并被安装在紫铜散热器中,使用水冷机将该散热器温度控制在 18°C 。锁模腔由 SESAM、三个平面镜和三个曲面镜构成,腔长约为 2487 mm。各个腔臂的长度如下:OC 到 M5 的距离为 600 mm, M5 到 M1 的距离为 200 mm, M1 到晶体前端面的距离为 50 mm,晶体后端面到 M2 的距离为 250 mm, M2 到 M3 的距离为 540 mm, M3 到 M4 的距离为 740 mm, M4 到 SESAM 的距离为 100 mm。M1 和 M2 镀有对 $1.8\sim 2.0 \mu\text{m}$ 波段高反(HR)和对泵浦光 793 nm 波长增透的膜层。M3、M4 和 M5 镀有对 $1.8\sim 2.0 \mu\text{m}$ 波段高反的膜层。M1 和 M3 为平面镜, M2、M4 和 M5 的曲率半径(ROC)分别为 500、200、500 mm。实验中使用了三个不同的 OC(ROC 为 ∞),其在 $1850\sim 1890 \text{ nm}$ 波段的透过率分别为 10%、20% 和 30%。使用商用 SESAM 启动锁模运转。通过仿真得到,激光晶体中的腔内振荡光斑半径约为 $150 \mu\text{m}$, SESAM 上的振荡光斑半径约为 $60 \mu\text{m}$ 。输出激光被分束器(BS)分成两束,其中一束用于表征脉冲参数。光电探头和示波器的带宽均为 12.5 GHz,足以分辨脉宽为 100 ps 或超过 100 ps 的超快脉冲。使用分辨率为 0.05 nm 的光学光谱分析仪记录输出激光光谱。

3 实验结果

在以往的 $\text{Tm}:\text{GdVO}_4$ 晶体激光研究中,其短波段激光性能没有得到充分研究。为了得到 $\text{Tm}:\text{GdVO}_4$ 晶体在短波段激光运转时的光谱特征以及输入输出性能,我们首先对 $\text{Tm}:\text{GdVO}_4$ 晶体的短波段连续激光性能进行了表征。实验中,用反射镜代替半导体可饱和

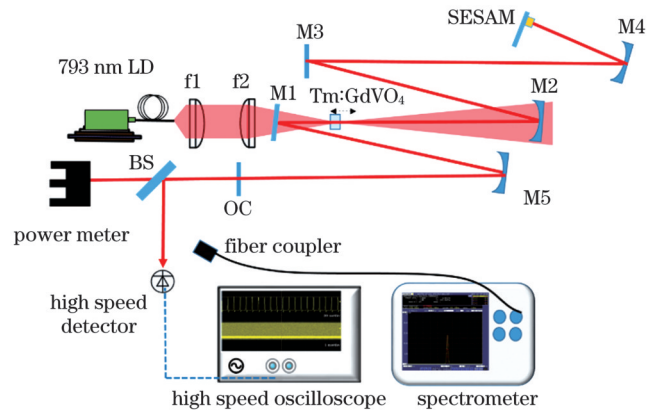


图 1 $\text{Tm}:\text{GdVO}_4$ 连续波锁模激光器的实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup diagram of CWML $\text{Tm}:\text{GdVO}_4$ laser

吸收镜,从而实现连续激光运转,其中该反射镜镀有对激光工作波长高反的膜层。在 16.25 W 的入射泵浦功率下,激光晶体对泵浦光的吸收率为 49%,为防止晶体热损伤,以该功率作为最大泵浦功率。图 2 显示了使用不同输出耦合镜时,连续波运转状态下 $\text{Tm}:\text{GdVO}_4$ 激光输出功率随吸收泵浦功率的变化。最大泵浦功率下的输出功率均超过 1 W,在使用透过率(T)为 20% 的 OC 时能获得 1.04 W 的最大输出功率。随着 OC 的透过率从 10% 提高到 30%,输出激光的斜率效率从 19% 提高到 25%。图 3 显示了使用不同透过率的 OC 时连续波运转的激光光谱,当使用透过率为 10% 和 20% 的 OC 时,能观察到双波长振荡。当使用透过率为 30% 的 OC 时,激光只在 1851 nm 处振荡。OC 的较高透过率抑制了激光增益光谱中较弱的峰起振,使得双波长振荡被抑制。

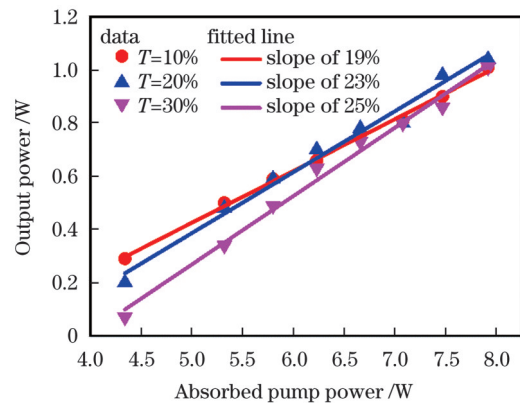


图 2 使用具有不同透过率的 OCs 时连续波激光器的输出功率

Fig. 2 Output powers of CW lasers using OCs with different T

使用半导体可饱和吸收镜替换平面高反镜,并经过仔细的调节,实现了激光连续波锁模运转。当使用不同透过率的输出耦合镜时,锁模状态下的 $\text{Tm}:\text{GdVO}_4$ 激光输出功率与吸收泵浦功率如图 4 所示。作为示例,这里将详细描述使用透过率为 30% 的 OC 时的锁模激光性能。当使用透过率为 30% 的 OC 且吸收的泵浦功率增加到 4.14 W 时,激光开始振荡;当吸收

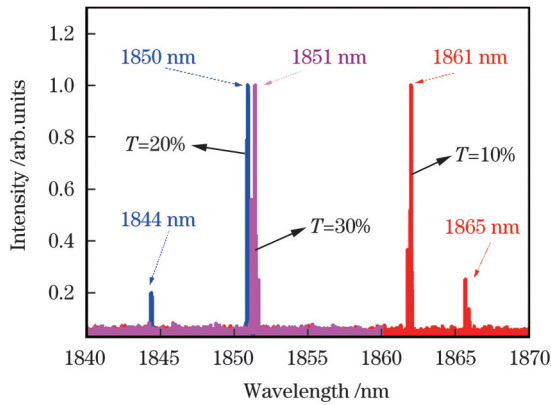


图3 使用具有不同透过率的OCs时连续波激光器的输出光谱
Fig. 3 Output spectra of CW lasers using OCs with different T

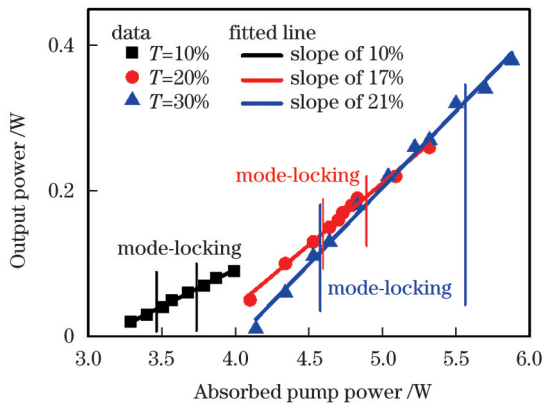


图4 使用具有不同透过率的OCs时连续波锁模激光器的输出功率
Fig. 4 Output powers of CWML lasers using OCs with different T

的泵浦功率增加到 4.64 W 时,能观察到稳定的连续波锁模激光脉冲序列;当吸收的泵浦功率为 5.5 W 时,连续波锁模激光的最大平均输出功率为 0.32 W,斜率效率为 21%;此后随着泵浦功率的进一步增加,锁模由稳定状态重新变成了不稳定状态,这是因为腔内激光模式随着泵浦功率的增加而发生了改变,所以晶体内部和 SESAM 上的光斑大小发生了改变,不再满足稳定锁模的条件。从图 4 还可以看出,稳定锁模区位于两条垂直线所示的吸收泵浦功率之间,稳定锁模区随着透过率的增加而变宽。因为高透过率下的激光效率更高,晶体上泵浦光带来的热量沉积更少,从而腔内激光模式的变化速度趋缓,稳定锁模区间变宽。在使用透过率为 30% 的 OC 的情况下,当吸收泵浦功率为 5.3 W 时,脉冲序列射频 (RF) 频谱如图 5 所示。可以看出,脉冲的重复频率约为 60.3 MHz,与谐振腔腔长 2487 mm 相对应,对应的基频信号的最大信噪比 (SNR) 约为 59 dBm。在 0~1 GHz 范围内只观察到了基频的对应谐波,而没有观察到其他频率的对应谐波,这表明模式锁定是稳定的,没有输出多脉冲。当最大平均输出功率为 0.32 W 时,对应的单脉冲能量为 5.3 nJ。

使用透过率为 10% 和 20% 的 OC 也能观察到上述类似的情况。在使用透过率为 10% 的 OC 的情况下,连续波锁模激光的最大平均输出功率为 0.06 W,对应的单脉冲能量为 1.0 nJ;在使用透过率为 20% 的 OC 的情况下,连续波锁模激光的最大平均输出功率为 0.19 W,对应的单脉冲能量为 3.1 nJ。

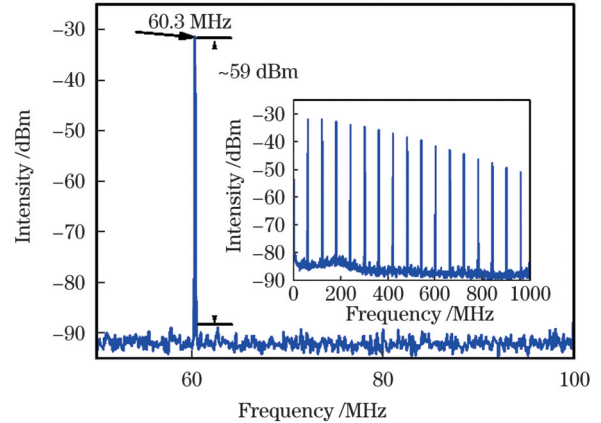


图5 使用透过率为 30% 的 OC 时脉冲序列的 RF 频谱图(插图
为 0~1 GHz 范围内的 RF 频谱图)
Fig. 5 RF spectrum of pulse trains when OC with transmittance of 30% is used with RF spectrum in 0~1 GHz range shown in inset

图 6 显示的是连续波锁模激光光谱。在不同透过率下,锁模激光的中心波长均接近 1851.6 nm,对应的光谱宽度均为 0.05 nm。值得注意的是,因为光谱仪分辨率为 0.05 nm,这意味着激光的实际光谱宽度不大于 0.05 nm。对于 Tm^{3+} 固体激光器,在连续光输出状态下,我们观察到了实际输出波长随腔内损耗的提高(对应于 OC 透射率的提高)而蓝移的现象,原因在于 Tm^{3+} 的净增益谱的峰值随着腔内损耗的提高而出现蓝移,但是蓝移到的最短波长由 Tm^{3+} 净增益谱峰值波长的相对高度来决定,从连续光实验结果来看,1851 nm 波长是净增益谱具有优势的峰值波长。在锁

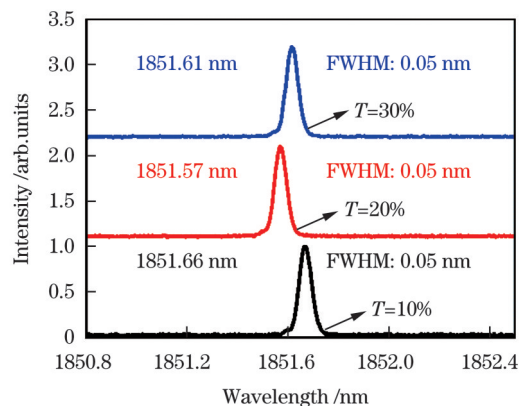


图6 使用具有不同透过率的OCs时连续波锁模激光器的输出光谱
Fig. 6 Output spectra of CWML lasers using OCs with different T

模实验中,随着 SESAM 的引入,从平均功率输出情况可见,锁模激光运转时的损耗比使用 $T=30\%$ 的 OC 时的损耗大,所以将锁模波长固定在 1851 nm 附近。图 7 显示,当使用透过率分别为 10%、20% 和 30% 的不同输出耦合镜时,得到的激光脉冲脉宽分别为 474、752、651 ps。

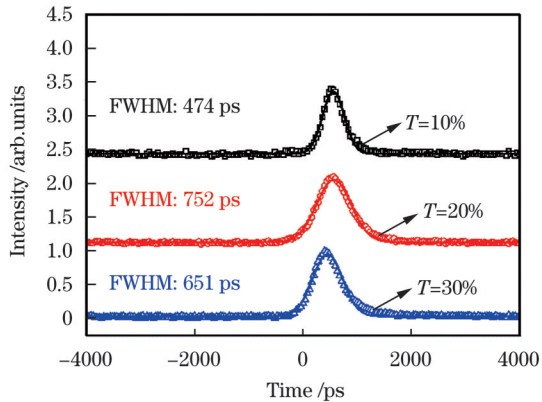


图 7 使用具有不同透过率的 OCs 时连续波锁模激光器的脉冲轮廓图

Fig. 7 Pulse profiles of CWML lasers using OCs with different T

根据高斯脉冲时域和频率的关系方程 $\Delta\nu \times \Delta\tau \geq 0.441$ 可知,当脉冲宽度为 752 ps 时,所需的最小光谱宽度在理论上为 0.0067 nm。考虑到最大谱宽不超过 0.05 nm 和实际的纵模间隔为 60.3 MHz,因此激光光谱包含的纵模数目为 10~72。在相关的固体飞秒激光实验中,研究者们也发现,激光光谱线宽(激光脉宽)与输出耦合镜透过率的大小存在关联,即透过率越大,输出激光光谱越窄,对应的脉宽越长。在理论上,锁模激光的各个纵模之间是存在增益竞争的,而透过率越大(对应腔内损耗越大)会导致腔内光子的平均寿命越短(腔内光子的平均寿命反比于腔内损耗),因此在各个纵模的竞争中,输出耦合镜的透过率越大越有利于中心波长的纵模获得优势,从而边缘纵模起振得到抑制,进而光谱变窄。

4 结 论

验证了一个 1.85 μm 亚 ns 脉宽的连续波被动锁模 $\text{Tm}:\text{GdVO}_4$ 激光器。首先对 $\text{Tm}:\text{GdVO}_4$ 晶体短波段连续激光性能进行了表征。对于连续波运转,当使用透过率分别为 10%、20% 和 30% 的不同 OC 时,在 16.25 W 的人射泵浦功率下,该激光器均产生了略超 1 W 的输出功率。随着 OC 的透过率从 10% 提高到 30%,输出激光的斜率效率从 19% 提高到 25%。当使用透过率为 10% 的 OC 时,激光在 1861 nm 和 1865 nm 波长处同时起振;当使用透过率为 20% 的 OC 时,激光在 1844 nm 和 1850 nm 波长处同时起振;当使用透过率为 30% 的 OC 时,激光波长只在 1851 nm 处振荡。通过使用一个商用半导体可饱和吸收镜替换平面高反

镜,启动了锁模运转。在稳定的连续波锁模激光运转情形下:当使用透过率为 30% 的 OC 时,最大平均输出功率为 0.32 W,对应的单脉冲能量为 5.3 nJ,输出脉宽为 651 ps;当使用透过率为 20% 的 OC 时,最大平均输出功率为 0.19 W,对应的单脉冲能量为 3.1 nJ,输出脉宽为 752 ps;当使用透过率为 10% 的 OC 时,最大平均输出功率为 0.06 W,对应的单脉冲能量为 1.0 nJ,输出脉宽为 474 ps;射频谱测量显示脉冲重复频率为 60.3 MHz。在不同透过率下,锁模激光的中心波长均接近 1851.6 nm。实验结果表明,锁模激光的光谱宽度始终不高于光谱仪 0.05 nm 的分辨率。这种具有高重复率和亚纳秒脉宽的脉冲激光器可以作为相关应用的技术方案。

参 考 文 献

- [1] Vangipuram R, Hamill S S, Friedman P M. Accelerated tattoo removal with acoustic shock wave therapy in conjunction with a picosecond laser[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2018, 50(9): 890-892.
- [2] Hintikka M, Kostamovaara J. Experimental investigation into laser ranging with sub-ns laser pulses[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(3): 1047-1053.
- [3] Rahman M A, de la Fuente G F, Carretero J M, et al. Sub-nspulsed laser cleaning of an archaeological bone from the *Sierra de Atapuerca*, Spain: a case study[J]. *SN Applied Sciences*, 2021, 3(12): 865.
- [4] Okuno M, Kano H, Leproux P, et al. Ultrabroadband ($>2000 \text{ cm}^{-1}$) multiplex coherent anti-Stokes Raman scattering spectroscopy using a subnanosecond supercontinuum light source [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(20): 3050-3052.
- [5] Maunier C, Bertussi B, Damiani D, et al. Comparison of ns and sub-ns laser conditioning of KDP and DKDP crystals for high-power lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6720: 67201L.
- [6] Pavel N, Tsunekane M, Taira T. Composite, all-ceramics, high-peak power Nd: YAG/Cr⁴⁺: YAG monolithic micro-laser with multiple-beam output for engine ignition[J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9378-9384.
- [7] Lim H H, Taira T. Sub-nanosecond laser induced air-breakdown with giant-pulse duration tuned Nd: YAG ceramic micro-laser by cavity-length control[J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 6302-6310.
- [8] Chuchumishev D, Marchev G, Buchvarov I, et al. Sub-ns OPO based on PPKTP with 1 mJ idler energy at 2.8 μm [C]//2013 Conference on Lasers & Electro-Optics Europe & International Quantum Electronics Conference CLEO EUROPE/IQEC, May 12-16, 2013, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2014.
- [9] Bhandari R, Taira T. Palm-top size megawatt peak power ultraviolet microlaser[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(7): 076102.
- [10] Han S, Liu Y Q, Zhang F, et al. Sub-nanosecond passively Q-switched Nd: YVO₄/Cr⁴⁺: YAG microchip lasers[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 68: 197-200.
- [11] Lim H H, Taira T. High peak power Nd: YAG/Cr: YAG ceramic microchip laser with unstable resonator[J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 31307-31315.
- [12] Rong X F, Yang Y M, Peng S Z, et al. Sub-nanosecond diode-pumped passively Q-switched Nd: LuAG ceramic microchip lasers [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 158: 108901.
- [13] Liu X, Tan C Y, Cheng Y, et al. 7 kHz sub-nanosecond microchip laser amplified by a grazing incidence double pass slab amplifier[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(2): 021403.
- [14] Gribanov A, Yakovin M, Yakovin D, et al. Subharmonic mode

- locking of a Q-switched Nd: YAG laser[J]. Chinese Optics Letters, 2023, 21(3): 031406.
- [15] Mužik J, Kubeček V, Jelínek M, et al. 1.2 W actively mode-locked Tm: YLF laser[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9441: 94410E.
- [16] Mužik J, Jelínek M, Jr, Vyhliďal D, et al. 2.6 W diode-pumped actively mode-locked Tm: YLF laser[J]. Laser Physics Letters, 2015, 12(3): 035802.
- [17] Ma J, Qin Z P, Xie G Q, et al. Review of mid-infrared mode-locked laser sources in the 2.0–3.5 μm spectral region[J]. Applied Physics Reviews, 2019, 6(2): 021317.
- [18] Wang L, Chen W D, Zhao Y G, et al. Power-scalable sub-100-fs Tm laser at 2.08 μm [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2021, 9: e50.
- [19] Pan Z B, Wang Y C, Zhao Y G, et al. Generation of 84-fs pulses from a mode-locked Tm: CNNGG disordered garnet crystal laser [J]. Photonics Research, 2018, 6(8): 800-804.
- [20] Wang Y C, Zhao Y G, Pan Z B, et al. 78 fs SWCNT-SA mode-locked Tm: CLNGG disordered garnet crystal laser at 2017 nm[J]. Optics Letters, 2018, 43(17): 4268-4271.
- [21] Zhao Y G, Wang Y C, Zhang X Z, et al. 87 fs mode-locked Tm: Ho: CaYAlO₄ laser at \sim 2043 nm[J]. Optics Letters, 2018, 43(4): 915-918.
- [22] Zhao Y G, Wang Y C, Chen W D, et al. 67-fs pulse generation from a mode-locked Tm, Ho: CLNGG laser at 2083 nm[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 1922-1928.
- [23] Li Y F, Yao B Q, Wang Y Z. Diode-pumped CW Tm: GdVO₄ laser at 1.9 μm [J]. Chinese Optics Letters, 2006, 4(3): 175-176.
- [24] Li Y F, Yao B Q, Liu Y M, et al. Widely tunable CW diode-pumped 1.9- μm Tm: GdVO₄ laser at room temperature[J]. Chinese Physics Letters, 2007, 24(3): 724-726.
- [25] Wang Z G, Song C W, Li Y F, et al. CW and pulsed operation of a diode-end-pumped Tm: GdVO₄ laser at room temperature[J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(2): 105-108.
- [26] Ge P G, Liu J, Jiang S Z, et al. Compact Q-switched 2 μm Tm: GdVO₄ laser with MoS₂ absorber[J]. Photonics Research, 2015, 3(5): 256-259.
- [27] Loiko P, Bogusławski J, Serres J M, et al. Sb₂Te₃ thin film for the passive Q-switching of a Tm: GdVO₄ laser[J]. Optical Materials Express, 2018, 8(7): 1723-1732.
- [28] Esser M J D, Preussler D, Bernhardt E H, et al. Diode-end-pumped Tm: GdVO₄ laser operating at 1818 and 1915 nm[J]. Applied Physics B, 2009, 97(2): 351-356.
- [29] Lan J L, Xu B, Zhang Y Z, et al. Tunable and passively Q-switched laser operation of Tm: CaYAlO₄ between 1848 nm and 1876 nm[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 109: 33-38.

Passively Mode-Locked Tm: GdVO₄ Laser with Sub-Nanosecond Pulse Width

Zhou Weijie¹, Na Quanxin^{1,2}, Wang Yu¹, Xu Changwen^{1*}, Fan Dianyuan¹

¹International Collaborative Laboratory of 2D Materials for Optoelectronics Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;

²Pengcheng Laboratory, Shenzhen 518060, Guangdong, China

Abstract

Objective Laser sources possessing sub-nanosecond pulse widths, such as mode-locked lasers, have garnered significant attention owing to their wide-ranging applications in fields such as medical cosmetology, lidar, archaeological bone cleaning, engine ignition, and pumping optical parametric oscillators (OPOs) for mid-infrared lasers. The generation of laser pulses possessing sub-nanosecond widths is generally achieved through passively Q-switched microchip lasers or actively mode-locked lasers. However, in the case of the latter, a repetition rate of approximately 100 MHz-level is attained, necessitating the use of an acousto-optic or electro-optic modulator, which renders the system complicated. On the other hand, the former method achieves high peak power but only offers a repetition rate at the kilohertz level. Thus, there exists a need to explore the use of passively mode-locked lasers possessing narrow laser spectrums, which can generate laser pulses possessing sub-nanosecond widths and high repetition rates.

Methods The experimental setup is shown in Fig. 1. The pump source is a fiber-coupled laser diode (LD) at 793 nm, with the maximum output power of 30 W, the numerical aperture of 0.22, and the core diameter of 105 μm . The pump spot diameter is approximately 168 μm in the center of the Tm: GdVO₄ crystal, which is transformed by lens f1 (focal length $f=50$ mm) and f2 ($f=80$ mm). A Tm³⁺: GdVO₄ crystal with size of 3 mm \times 3 mm \times 4 mm is used as the gain medium, and both surfaces of this crystal are antireflection (AR) for the pump and laser wavelengths. The crystal is enclosed with indium foil and fixed onto a copper heat sink, which is kept at a temperature of 18 $^{\circ}\text{C}$ using a water chiller. To achieve mode-locking, a semiconductor saturable absorption mirror (SESAM), three plane mirrors, and three curved mirrors are employed to construct a resonator with a cavity length of 2487 mm, corresponding to a repetition rate of 60.3 MHz. M1 and M2 are coated with high reflectivity (HR) films at 1.8–2.0 μm and high transmission films at 793 nm pump light, respectively. M3, M4, and M5 are coated with the HR films at the laser wavelength. The radii of curvature (ROC) of M2, M4, and M5 are 500, 200, and 500 mm, respectively. Three output couplers (OCs) (ROC is ∞) with transmission of 10%, 20%, and 30% at 1850–1890 nm are separately used in the experiment. The bandwidth of the high-speed detector and the high-speed digital oscilloscope is 12.5 GHz, which is enough to diagnose an ultrafast pulse with a pulse width of approximately 100 ps or beyond. An optical spectrum analyzer with a resolution of 0.05 nm is used to record the laser spectrum.

Results and Discussions For the continuous-wave (CW) operation, three different OCs with transmissions of 10%, 20% and 30% are used, and the maximum output power exceeds 1 W. The wavelengths of the CW lasers are 1844, 1850, 1851, 1861, and 1865 nm, respectively (Fig. 3). For the continuous-wave mode-locking (CWML) operation, a commercial SESAM is used. A

maximum average output power of 320 mW is achieved using the OC with 30% transmission (Fig. 4). When the absorbed pump power is 5.3 W, the signal-noise ratio (SNR) of the fundamental frequency signal is approximately 59 dBm in the radio frequency (RF) spectrum of the pulse trains at the OC with 30% transmission (Fig. 5). Stable outputs are achieved for all the three different OCs. The operating wavelengths of the mode-locked lasers are around 1851.6 nm and their full width at half-maximum (FWHM) values are always below the resolution of 0.05 nm (Fig. 6). The pulse durations for the three different OCs are 474, 752, and 651 ps (Fig. 7).

Conclusions This study presents the demonstration of a sub-nanosecond pulse width mode-locked Tm:GdVO₄ laser at 1.85 μm. To narrow the spectral widths of the laser pulses, we employ output couplers with high transmission. By using different OCs with transmission of 10%, 20%, and 30%, pulse durations of 474, 752, and 651 ps are obtained, corresponding to maximum pulse energies of 1.0, 3.5, and 5.3 nJ, respectively. The repetition rate of the laser pulses is approximately 60.3 MHz.

Key words lasers; solid-state lasers; passive mode-locking; semiconductor saturable absorber mirror; sub-picosecond; diode-pumped laser; Tm:GdVO₄ laser