

文章编号: 1000-7032(2021)07-1049-08

被动调 Q 锁模运转 Tm: LuScO₃ 陶瓷激光器特性

张明霞, 袁 振, 杜晓娟, 王 翀, 王文婷, 薛婧雯, 令维军*, 董 忠*

(天水师范学院 激光技术研究所, 甘肃 天水 741000)

摘要: 利用固态反应烧结方法制做的混合三氧化物陶瓷 Tm: LuScO₃ 作为激光增益介质, 在全固态激光器中实现了稳定的调 Q 锁模运转。利用透过率为 3% 的输出镜获得最高连续光输出功率为 257 mW, 中心波长为 1 993 nm, 对应斜效率 14.06%。以三种半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 作为锁模启动元件, 系统分析了 Tm: LuScO₃ 陶瓷激光器的调 Q 锁模运转特性, 获得最窄锁模脉冲宽度在 749 ~ 891 ps 之间, 重复频率 121.9 MHz, 对应的调 Q 包络脉冲宽度为 50 μ s, 重复频率 45.45 kHz, 最高输出功率 167 mW, 中心波长为 1 987 nm, 对应最大单脉冲能量为 1.37 nJ。

关键词: 调 Q 锁模; 2 μ m 激光; Tm: LuScO₃ 陶瓷激光器; 半导体可饱和吸收镜

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20210165

Characteristics of Passively Q -switched Mode Locked Tm: LuScO₃ Ceramic Laser

ZHANG Ming-xia, YUAN Zhen, DU Xiao-juan, WANG Chong, WANG Wen-ting,

XUE Jing-wen, LING Wei-jun*, DONG Zhong*

(Institute of Laser Technology, Tianshui Normal University, Tianshui 741000, China)

* Corresponding Authors, E-mail: wjlings@sina.com; dz0212@foxmail.com

Abstract: The stable Q -switched mode-locked operation of Tm: LuScO₃ mixed trioxide ceramics prepared by solid-state reaction sintering method is demonstrated in an all solid-state laser. The maximum continuous wave output power is 257 mW with 3% output mirror. The central wavelength is 1 993 nm and the slope efficiency is 14.06%. The narrowest mode-locked pulse width is 749 – 891 ps, the repetition rate is 121.9 MHz, the corresponding Q -switched envelope pulse width is 50 μ s, the repetition rate is 45.45 kHz, the maximum output power is 167 mW, the center wavelength is 1 987 nm, and the corresponding maximum single pulse energy is 1.37 nJ.

Key words: Q -switched mode-locked; 2 μ m laser; Tm: LuScO₃ ceramic laser; semiconductor saturable absorber mirror (SESAM)

1 引 言

全固态激光器以其体积小、效率高、性能稳定等特点历来是激光技术研究的热点方向之一。在固体激光技术及其相关领域的发展中,增益介质的开发是研究的基础和先导,决定着能否产生高

性能的激光振荡。近年来,随着制备工艺的进步,激光陶瓷是继单晶、玻璃之后又一值得瞩目的激光增益介质,由于兼具了晶体和玻璃材料的优点,使得激光陶瓷为固体激光器的发展提供了一个多样性的选择。Ikesue 在 *Nature Photonics* 上发表了关于陶瓷激光器的综述性文章,总结了陶瓷激光

收稿日期: 2021-04-30; 修订日期: 2021-05-15

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405204); 国家自然科学基金(11774257, 61564008); 甘肃省高等学校产业支撑计划项目(2020C-23); 甘肃省重点研发计划项目(21YFJG300); 天水师范学院研究生创新引导项目(TYCX2035)资助
Supported by National Key R&D Program of China (2017YFB0405204); National Natural Science Foundation of China (11774257, 61564008); Industrial Support Program for Colleges and Universities in Gansu Province (2020C-23); Key R&D Plan of Gansu Province (21YFJG300); Tianshui Normal University Postgraduate Innovation Guidance Project (TYCX2035)

器的发展现状和未来趋势,同时预言陶瓷将成为未来固体激光器发展的新范式^[1]。对应人眼安全区域和大气窗口的 2 μm 波段激光,在大气传输^[2]、激光雷达^[3]、激光医疗^[4]等领域有着重要的应用潜力,所以 2 μm 波段的陶瓷固体激光器必将受到人们更大的关注。

目前,2 μm 波段全固态激光器中最普遍的激光增益介质为单晶,该介质的激光器适用于各种连续和脉冲激光器件。人们已在许多类基质中成功实现了激光被动锁模运转,钨酸盐基质如 KLuW ^[5-6]、 NaYW ^[7] 和 KYW ^[8-9],氧化物基质如 Lu_2O_3 ^[10-12]、 Sc_2O_3 ^[13],石榴石基质如 YAG ^[14-15]、 YAP ^[16]、 CaYAlO_4 ^[17]、 CaGdAlO_4 ^[18]、 LuAG ^[19],氟化物基质如 GdLiF_4 ^[20]、 LiLuF_4 ^[21]。玻璃也是一种重要的激光介质,玻璃基质如 CLNGG ^[22]、 Glass ^[23],其制作工艺简单,可以实现大尺寸及稀土元素高浓度掺杂,热致双折射效应低;但是,玻璃的缺点主要是热导率和硬度不够高、荧光线宽较宽及激光振荡阈值较高。激光陶瓷具有与激光晶体大致类似的光谱和激光特性,同时具有可以获得大尺寸、高质量的潜在优势。除此之外,由于陶瓷的特殊晶界结构,又使得激光陶瓷具有与激光晶体不同的性能。激光透明陶瓷制备周期短,生产成本低,能够大规模生产,可掺杂浓度高,其热导率介于晶体和玻璃之间,优于玻璃,劣于晶体。

在各种材料中,石榴石型的晶体和稀土倍半氧化物是制备激光透明陶瓷的主要选择,目前 2 μm 波段的关于激光透明陶瓷材料的报道非常少,研究最广泛并且最具有代表性的激光陶瓷材料就是 YAG 和 Lu_2O_3 。石榴石型的 YAG 陶瓷分为 $\text{Tm}:\text{YAG}$ 和 $\text{Tm},\text{Ho}:\text{YAG}$,其中在 $\text{Tm}:\text{YAG}$ 陶瓷全固态激光器中,得到了输出 7.3 W、中心波长 2 015 nm 的连续光运转^[24]。利用 SESAM 、石墨烯分别得到最短 3 ps^[25] 和 2.8 ps^[26] 的锁模脉冲输出,对应中心波长分别为 2 012 nm 和 2 016 nm。在 $\text{Tm},\text{Ho}:\text{YAG}$ 陶瓷全固态激光器中,得到输出 1.2 W、中心波长 2 090 nm 和 2 096 nm 的双波长连续光运转^[27]。利用稀土倍半氧化物 $\text{Tm}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 陶瓷作为激光增益介质,得到输出 34 W、中心波长 2 068 nm 的连续光运转^[28],利用 SESAM 获得最短 180 fs^[29] 的锁模脉冲输出,对应中心波长为 2 076 nm。近期,Xu 等首次成功制备了 $\text{Tm}:\text{LuScO}_3$ 混合三氧化物陶瓷,并利用直腔成功

实现连续和调 Q 激光输出,对应的中心波长分别为 1 980 nm 和 1 976 nm,并详细描述了该陶瓷的特性^[30]。该工作丰富了激光透明陶瓷材料在 2 μm 波段的种类,并且在掺 Tm^{3+} 或 $\text{Tm}^{3+}、\text{Ho}^{3+}$ 共掺陶瓷全固态激光器中其中心波长首次小于 2 μm ,恰好位于水分子强吸收带 1 800 ~ 2 000 nm 区域,因而必将会有更大的应用潜力,引起了研究人员的关注。

利用自行搭建的可调谐掺钛蓝宝石固体激光器作为掺 Tm^{3+} 或 $\text{Tm}^{3+}、\text{Ho}^{3+}$ 共掺激光增益介质的抽运源,其光束质量好,波长从 740 ~ 844 nm 可调,基本包涵掺 Tm^{3+} 或 $\text{Tm}^{3+}、\text{Ho}^{3+}$ 激光增益介质的其中一个或几个吸收峰,从而利用一台泵浦源即可方便地研究不同掺 Tm^{3+} 或 $\text{Tm}^{3+}、\text{Ho}^{3+}$ 共掺的激光增益介质。利用该泵浦源,我们对 $\text{Tm}:\text{LuScO}_3$ 陶瓷超快输出特性进行了系统研究,在 X 型折叠腔中成功实现了 $\text{Tm}:\text{LuScO}_3$ 陶瓷最高输出功率 257 mW、斜效率 14.06% 的连续光输出,中心波长为 1 992 nm,并利用低损耗的商业化 SESAM ,成功实现稳定的调 Q 锁模运转。在 Xu 等工作的基础上,我们进一步研究了该 $\text{Tm}:\text{LuScO}_3$ 陶瓷的吸收特性,提出后期优化该激光陶瓷的方案,实现了更低阈值、更高斜效率的连续光运转,同时实验上探究了利用不同 SESAM 获得的调 Q 锁模运转特性,对今后该晶体的改进、实现连续锁模运转及应用提供了更加细致的参考和指导。

2 实验装置

$\text{Tm}:\text{LuScO}_3$ 陶瓷激光器连续和调 Q 锁模运转实验装置如图 1 所示,泵浦源是我们自行设计搭

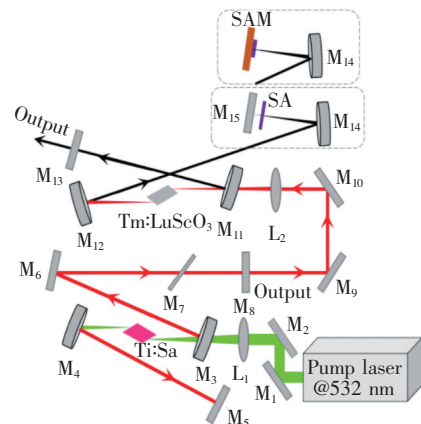


图 1 $\text{Tm}:\text{LuScO}_3$ 陶瓷连续和调 Q 锁模激光实验装置

Fig. 1 Experiment setup of $\text{Tm}^{3+}:\text{LuScO}_3$ ceramic lasers in CW and QML regimes

建的可调谐掺钛蓝宝石激光器, 通过双折射滤光片 M₇ 可将泵浦光中心波长从 740 nm 逐步调到 844 nm, 从而找出 Tm: LuScO₃ 陶瓷在该范围的最高吸收波长。图 2 为 2 W 泵浦光功率下 Tm: LuScO₃ 陶瓷吸收功率随泵浦光中心波长的变化曲线, 得出晶体在中心波长 795.7 nm 处吸收功率最高。故本实验选用中心波长 795.7 nm、光谱宽度 0.6 nm、最高功率 3.5 W 的泵浦光作为 Tm: LuScO₃ 陶瓷的抽运源。

Tm: LuScO₃ 陶瓷谐振腔采用典型的 X 型五镜折叠腔, 聚焦透镜 L₂ 焦距为 120 mm, 折叠镜 M₁₁、M₁₂ 和 M₁₄ 凹面曲率半径均为 100 mm, 对 770 ~

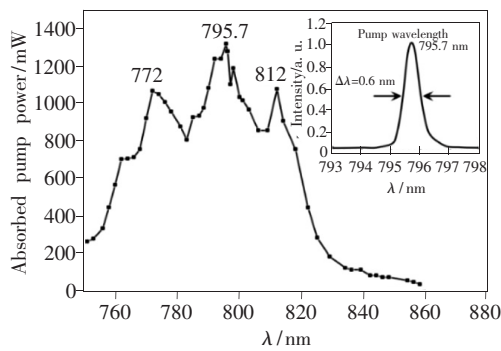


图 2 Tm: LuScO₃ 陶瓷对泵浦光不同波长的吸收功率图
Fig. 2 Diagram of Tm: LuScO₃ ceramic absorption power on the pumping light at different wavelengths

1 050 nm 波段激光透过率 > 95%, 对 1 800 ~ 2 075 nm 波段激光反射率 > 99.9%。M₁₅ 为对 1 800 ~ 2 075 nm 波长激光的反射率 > 99.9% 的高反平面镜, 输出耦合镜 M₁₃ 有 0.9%、1.5%、3% 和 5% 四种透过率。

Tm: LuScO₃ 陶瓷采用布氏角切割, 两端面均被抛光, 晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 5 mm, Tm³⁺ 的掺杂浓度为 2%。由于 Tm: LuScO₃ 陶瓷存在量子缺陷引起的较低热导率, 通过水冷可以有效地解决该增益介质的热效应。将 Tm: LuScO₃ 陶瓷用铜箔包裹, 夹在紫铜加工的冷却块内, 用 13 °C 的恒温循环水进行冷却。为了保证低温下晶体表面不会出现冷凝水珠, 我们将实验室湿度保持在 30% 左右。由于该波段更接近于水分子强吸收波段, 所以水蒸气会对锁模产生较大的影响, 从而加大了锁模的难度, 降低湿度更有益于实现该陶瓷的锁模运转。

启动锁模所用的可饱和吸收体为德国 BAPTOP 公司商业生产的反射式和透射式可饱和吸收体, 分别用数字①、②和③表示, 详细参数见表 1。利用激光传输 ABCD 矩阵模拟振荡光斑, 可以计算出晶体中最小光腰半径为 33 μm, 可饱和吸收体位置处光腰半径约为 80 μm。

表 1 可饱和吸收体详细参数

Tab. 1 Detailed parameter of saturable absorber

Number	Name	High reflection band/nm	Absorbance/%	Modulation depth/%	Saturation fluence/(μJ · cm ⁻²)	Relaxation time constant/ps	Picture
①	SAM-1920	1 880 ~ 1 980	2	1.2	45	30	
②	SAM-2000	1 700 ~ 2 150	2	1.2	70	10	
③	SA-2000	1 900 ~ 2 100	1	0.9	300	10	

3 连续光实验分析

Tm: LuScO₃ 陶瓷在 795.7 nm 抽运源处激光不同运转模式下, 对应的晶体吸收效率曲线如图 3(a) 所示, 当激光处于非运转状态时, 激光晶体的吸收效率为 59.66%, 相对于 Xu 课题组的 790 nm 抽运源 52% 的吸收效率, 增加了约 7%, 说明中心波长 795.7 nm 相对于 790 nm 更适合

作为 Tm: LuScO₃ 陶瓷的抽运源。当激光处于连续和调 Q 锁模运转状态时, 晶体的吸收效率进一步提高到 63.17%, 详细数据见表 2。导致吸收效率提高的原因是激光运转消耗 Tm: LuScO₃ 陶瓷内部的上能级离子数, 使得晶体的吸收效率上升了 3.51%。连续和调 Q 锁模运转或是选用不同的输出耦合镜基本不影响激光晶体的吸收效率。

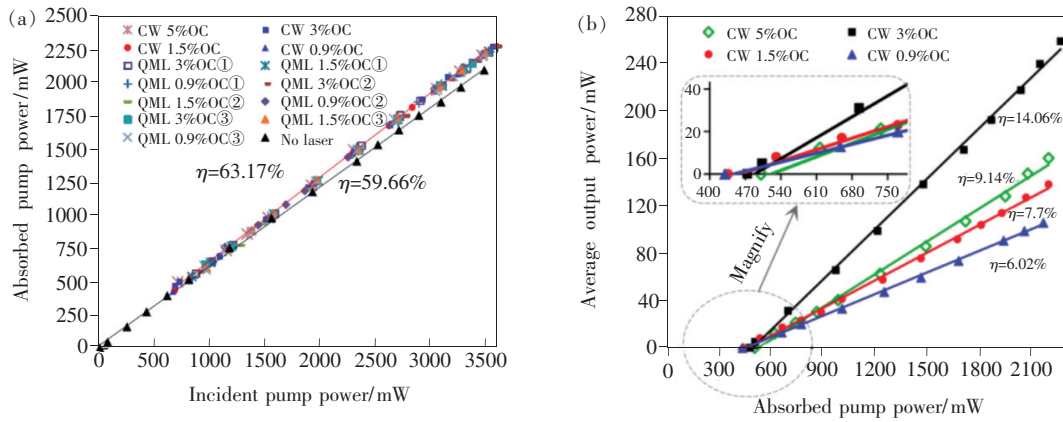


图 3 (a) 激光不同运转状态下的晶体吸收效率; (b) CW 和 QML 输出功率随吸收泵浦功率的变化关系。

Fig. 3 (a) Crystal absorption efficiency of different operating conditions of laser. (b) Change chart of the average output power in CW and QML with absorbed pump power.

表 2 不同激光运转下的实验详细数据

Tab. 2 Detailed data of different laser operation

Number	Output mirror transmission/%	Crystal absorption efficiency/%	Laser threshold power/mW	Mode-locked threshold power/mW	Slope efficiency/%	Maximum average power/mW	Central wavelength/nm	Spectral width/nm
No laser	—	59.66	—	—	—	—	—	—
CW	5	63.10	501	—	9.14	159	—	—
	3	63.17	474	—	14.06	257	1 993	5
	1.5	63.14	436	—	7.70	137	—	—
	0.9	63.32	430	—	6.02	105	—	—
①	3	63.19	566	2 100	10.04	167	—	—
	1.5	63.13	541	1 970	5.36	92	1 987	12
	0.9	63.56	530	1 850	3.73	64	—	—
②	3	63.20	591	2 160	7.63	130	—	—
	1.5	63.53	569	1 940	4.37	73	1 993	10
	0.9	63.37	559	1 680	2.69	46	—	—
③	3	63.09	635	2 090	8.61	129	—	—
	1.5	63.83	605	2 090	4.87	79	1 987	10
	0.9	63.77	592	1 930	3.31	54	—	—

图 3(b) 为激光在连续光运转下分别选用透过率为 0.9%、1.5%、3% 和 5% 的输出镜的输出功率随各自运转状态下的晶体吸收泵浦功率变化关系, 选用透过率为 3% 的输出镜时输出最大功率 257 mW 的连续光, 出光阈值功率为 474 mW, 斜效率为 14.06%。选用透过率为 1.5% 和 0.9% 输出镜时, 最高输出功率分别为 137 mW 和 105 mW, 出光阈值功率分别为 436 mW 和 430 mW, 斜效率分别为 7.7% 和 6.02%。选用透过率为 5% 输出镜时, 最高输出功率为 159 mW, 斜效率分别为 9.14%, 详细参数见表 2。

比较我们报道过的 $Tm, Ho: LLF^{[31]}$ 晶体, 在输出镜透过率为 1.5% 的同样腔型下, 该晶体在非激光运转下对泵浦光的吸收效率为 35.85%, 激光运转下的吸收效率约为 77%, 获得最高 985 mW 的连续输出功率, 出光阈值 143 mW, 斜效率为 39.8%, 远远大于 $Tm: LuScO_3$ 陶瓷在相同泵浦光功率下的输出功率, 且出光阈值更低。

我们分析高功率低阈值的激光输出主要归功于 $Tm, Ho: LLF$ 晶体的高发射截面、高掺杂浓度和合理的晶体长度等因素, 下一步我们将采用高掺杂和不同的晶体长度 $Tm: LuScO_3$ 陶瓷进一步实

验,以期得到更好的输出指标。

4 调 Q 锁模实验分析

如图 1 的激光实验装置,我们试验了不同的反射式和透射式可饱和吸收体,最终在 3 种可饱和吸收体中成功实现稳定的调 Q 锁模运转,3 种 SESAM 详细参数见表 1。连续光运转下,通过计算得出透过率为 0.9%、1.5%、3% 和 5% 输出镜对应的最高腔内功率分别为 11.67、9.13、8.57、3.18 W。选用透过率为 0.9%、1.5% 和 3% 输出镜进行锁模实验。

图 4(a)、(b)、(c) 分别为①、②和③号可饱和吸收体分别在 0.9%、1.5% 和 3% 输出镜下的输出功率随晶体的吸收功率变化曲线,图中 QML 节点之前激光基本处于杂乱的调 Q 锁模状态,节点之后处于稳定有序的调 Q 锁模状态。利用公式:

$$\Phi = \frac{P}{\pi FR^2}, \quad (1)$$

其中, Φ 为可饱和吸收体上的能流量, P 为 QML 节点处的腔内功率, F 为锁模脉冲的重复频率, R 为可饱和吸收体处的光腰半径,可估算出启动调 Q 锁模所需的能流量,即 QML 节点处的能流量。实验中①、②、③号可饱和吸收体在 QML 节点处的腔内功率约为 5、3.8、4 W, 锁模重复频率为 121.9 MHz, 可饱和吸收体处的光腰半径约为 80 μm 。计算出①、②、③号可饱和吸收体在 QML 节点的能流量分别为 204、155、163 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。①号可饱和吸收体在 3% 输出镜下获得最高 10.04% 的斜效率, 最高功率 167 mW 的调 Q 锁模激光运转。稳定锁模的阈值功率均不相同, 且 0.9% 的输出镜下更易实现调 Q 锁模运转, 原因是 0.9% 的输出镜下腔内的功率密度最高。更加详细参数见表 2。

图 4(d) 为连续和调 Q 锁模运转下通过光谱分析仪 (AvaSpec-NIR256-2.5TEC) 测量获得的光谱, 连续光的中心波长为 1 993 nm, 光谱的半高宽为 5 nm。①号可饱和吸收体调 Q 锁模脉冲的中

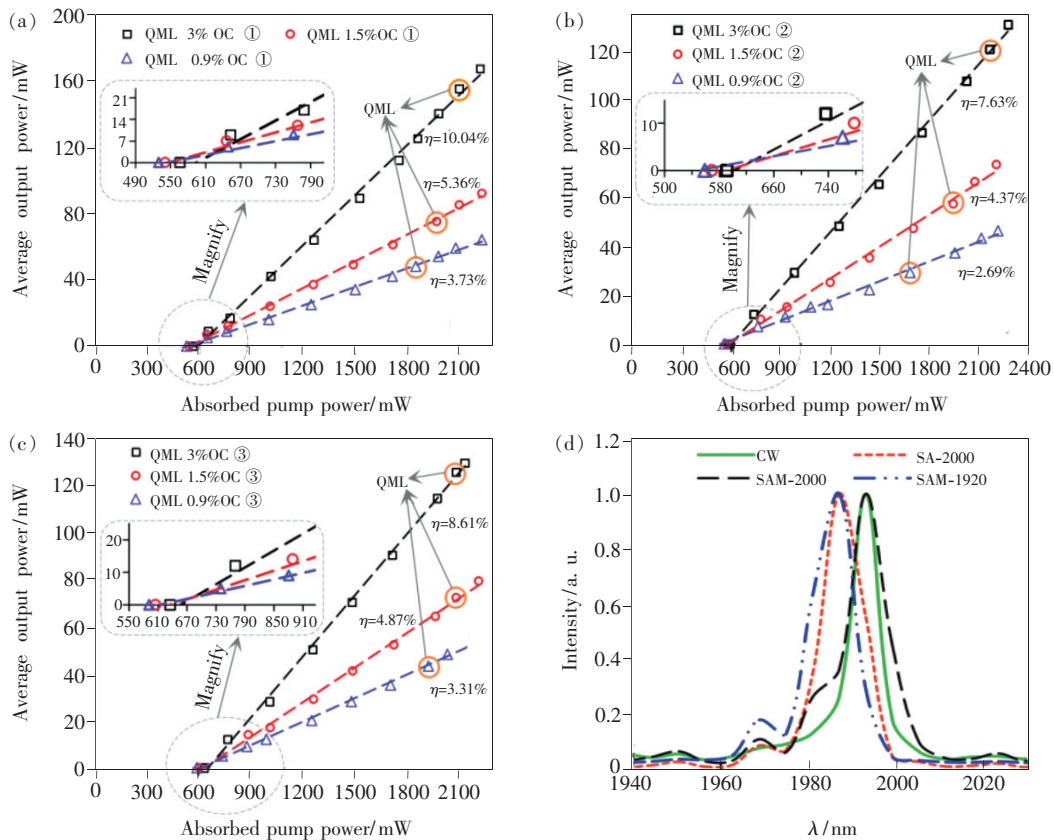


图 4 (a) ~ (c) ①、②和③号 SESAM 调 Q 锁模输出功率随泵浦吸收功率的变化关系; (d) 连续运转输出光谱和①、②和③号 SESAM 锁模光谱。

Fig. 4 (a) - (c) Q-switched mode-locked output power versus pump absorbed power of ①, ② and ③ SESAM, respectively. (d) CW and the Q-switched mode-locked spectra of ①, ② and ③ SESAM.

心波长为 1 987 nm,光谱的半高宽为 12 nm,相对于连续光光谱,光谱漂移 6 nm;②号可饱和吸收体调 Q 锁模脉冲的中心波长为 1 993 nm,光谱的半高宽为 10 nm;③号可饱和吸收体调 Q 锁模脉冲的中心波长为 1 987 nm,光谱的半高宽为 10 nm,相对于连续光光谱,光谱漂移 6 nm。可以看出,调 Q 锁模运转使得激光光谱被展宽,①号和③号可饱和吸收体光谱中心波长相对于连续光有 6 nm 的波长漂移。

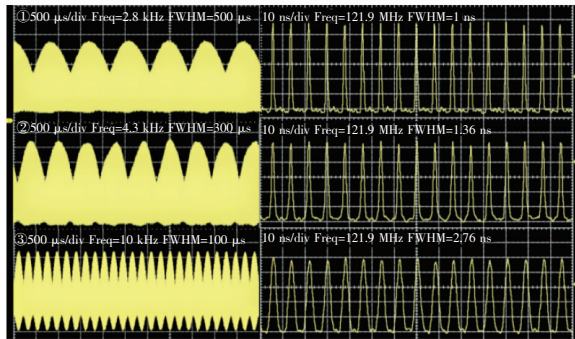


图 5 扫描时间为 100 μs 和 10 ns 的①、②、③号可饱和吸收体锁模脉冲序列。

Fig. 5 Mode-locked pulse trains recorded in 100 μs and 10 ns per division (div) time scales in ①, ②, ③.

表 2 为激光在不同运转状态下相关的具体参数, No laser 为激光非运转状态, CW 为连续运转激光状态, ①、②、③表示激光在通过①、②、③号可饱和吸收体输出的调 Q 锁模运转状态。对比表中数据可以看出, 无激光输出时激光晶体吸收效率最低, 运转状态下激光输出效率基本相同, 连续光运转下选用透过率为 3% 的输出镜获得最高的斜效率和输出功率。调 Q 锁模运转下①号可饱和吸收体更适合作为 Tm: LuScO₃ 陶瓷的锁模原件, 原因是①号可饱和吸收体具有最宽的平滑光谱, 且具有最小的锁模启动饱和能流通量, 因此更易于启动锁模获得高功率运转。通过快速光电二极管 (ET-5000) 连接 500 MHz 的数字示波器 (RIGOL, DS4054) 来进行连续锁模脉冲序列的探测。图 5 为 3 种 SESAM 在扫描时间为 100 $\mu\text{s}/\text{div}$ 和 10 ns 所获得的调包络和锁模脉冲序列, 锁模脉冲的重复频率均为 121.9 MHz。测得①号可饱和吸收体的最窄锁模脉冲上升沿为 1 ns, 对应的调 Q 包络脉冲宽度为 50 μs , 重复频率为 45.45 KHz; ②号可饱和吸收体的最窄锁模脉冲上升沿为 1.9 ns, 对应的调 Q 包络脉冲宽度为 100 μs , 重

复频率为 125 KHz; ③号可饱和吸收体的最窄锁模脉冲上升沿为 2.8 ns, 对应的调 Q 包络脉冲宽度为 150 μs , 重复频率为 83.3 KHz。通过锁模重复频率理论公式:

$$f = C/2L, \quad (2)$$

其中 C 为光速, L 为振荡腔的长度, 可以得出在误差允许范围内, 实验中所用的腔长 1.22 m 满足该公式。

在实验中, 脉冲宽度的测量采用商业自相关仪 (APE, pulse check 50) 来完成, 该自相关仪能测量的最大脉冲宽度为 12 ps, 但由于实际的脉冲宽度大于其最大脉冲宽度 12 ps, 且脉冲包含调 Q 成分, 所以无法用自相关仪测量锁模脉冲宽度。利用公式:

$$t_m = \sqrt{t_r^2 + t_p^2 + t_0^2}, \quad (3)$$

其中 t_m 为被测锁模脉冲上升沿时间, t_r 为实际锁模脉冲上升沿时间, t_p 为光电探测器上升沿时间, t_0 为示波器上升沿时间, 可估算锁模脉冲的宽度^[32]。实验中①、②、③号可饱和吸收体被测锁模脉冲上升沿时间约 1, 1.36, 2.76 ns, 光电探测器上升沿时间为 35 ps, 利用公式:

$$t_0 \times W_B = 0.35 \sim 0.4, \quad (4)$$

其中 W_B 为示波器带宽, 实验中示波器的带宽为 500 MHz, 可估算实验中 t_0 在 700 ~ 800 ps 之间, 因此可计算①、②、③号 SESAM 实际锁模脉冲上升沿时间分别为 599 ~ 713, 1 099 ~ 1 165, 2 641 ~ 2 670 ps 之间, 由于脉冲宽度约等于上升沿时间的 1.25 倍, 故①、②、③号可饱和吸收体实际锁模脉冲宽度在 749 ~ 891, 1 374 ~ 1 456, 3 301 ~ 3 338 ps 之间。通过提高泵浦功率, 有望实现连续锁模脉冲。

5 结 论

本文选用固态反应烧结方法制作的 Tm: LuScO₃ 混合三氧化物陶瓷, 首先利用可调谐的掺钛蓝宝石激光器作为泵浦源, 测得 Tm: LuScO₃ 陶瓷 740 ~ 844 nm 范围内的最大吸收中心波长为 795.7 nm。接着搭建典型的 X 型谐振腔, 分别通过 0.9%、1.5%、3% 和 5% 的输出镜实现了连续光运转, 中心波长为 1 993 nm, 在 3% 输出镜下, 获得最高输出功率为 257 mW, 斜效率为 14.06%。利用透过率为 0.9%、1.5%、3% 的输出镜, 结合三种不同的可饱和吸收体分别成功实现了稳定的调 Q 锁模运转, 获得最窄锁模脉冲宽度在 749 ~ 891 ps

之间,重复频率121.9 MHz,对应的调Q包络脉冲宽度为50 μs,重复频率45.45 kHz,中心波长为1 987 nm,对应最大单脉冲能量为1.37 nJ。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20210165>.

参 考 文 献:

- [1] IKESUE A, AUNG Y L. Ceramic laser materials [J]. *Nat. Photonics*, 2008, 2(12):721-727.
- [2] ZAKHAROV V I, GRIBANOV K G, FALKO M V, et al. Molecular atmospheric transmittance function in the range of 2 – 400 μm and earth radiation balance [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 1997, 57(1):1-10.
- [3] SUGIMOTO N, SIMS N, CHAN K, et al. Eye-safe 2.1-μm Ho lidar for measuring atmospheric density profiles [J]. *Opt. Lett.*, 1990, 15(6):302-304.
- [4] HÜTTMANN G, YAO C P, ENDL E. New concepts in laser medicine: towards a laser surgery with cellular precision [J]. *Med. Laser Appl.*, 2005, 20(2):135-139.
- [5] CHO W B, SCHMIDT A, YIM J H, et al. Passive mode-locking of a Tm-doped bulk laser near 2 μm using a carbon nanotube saturable absorber [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(13):11007-11012.
- [6] CHO W B, YIM J H, CHOI S Y, et al. Single-walled carbon nanotube saturable absorber mode-locking of a Tm: KLuW laser near 2 μm [C]. *Proceedings of Advanced Solid-State Photonics 2010, San Diego*, 2010.
- [7] SCHMIDT A, CHOI S Y, YEOM D I, et al. Femtosecond Nd pulses near 2 μm from a Tm: KLuW laser mode-locked by a single-walled carbon nanotube saturable absorber [J]. *Appl. Phys. Express*, 2012, 5(9):092704-1-3.
- [8] LAGATSKY A A, HAN X, SERRANO M D, et al. Femtosecond (191 fs) NaY(WO₄)₂ Tm, Ho-codoped laser at 2 060 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(18):3027-3029.
- [9] LAGATSKY A A, FUSARI F, BROWN C T A, et al. Femtosecond mode locking of a Tm, Ho: KYW laser near 2 μm [C]. *Proceedings of Advanced Solid-State Photonics 2010, San Diego*, 2010.
- [10] LAGATSKY A A, CALVEZ S, GUPTA J A, et al. Broadly tunable femtosecond mode-locking in a Tm: KYW laser near 2 μm [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(10):9995-10000.
- [11] SCHMIDT A, KOOPMANN P, HUBER G, et al. 175 fs Tm: Lu₂O₃ laser at 2.07 μm mode-locked using single-walled carbon nanotubes [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(5):5313-5318.
- [12] KOOPMANN P, LAMRINI S, SCHOLLE K, et al. Efficient diode-pumped laser operation of Tm: Lu₂O₃ around 2 μm. [J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36(6):948-950.
- [13] LAGATSKY A A, SUN Z, KULMALA T S, et al. 2 μm solid-state laser mode-locked by single-layer graphene [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 102(1):013113-1-4.
- [14] LAGATSKY A A, KOOPMANN P, FUHRBERG P, et al. Passively mode locked femtosecond Tm: Sc₂O₃ laser at 2.1 μm [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(3):437-439.
- [15] YANG K J, BROMBERGER H, RUF H, et al. Passively mode-locked Tm, Ho: YAG laser at 2 μm based on saturable absorption of intersubband transitions in quantum wells [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(7):6537-6544.
- [16] JIE L, WANG Y, QU Z, et al. 2 μm passive Q-switched mode-locked Tm³⁺: YAP laser with single-walled carbon nanotube absorber [J]. *Opt. Laser Tech.*, 2012, 44(4):960-962.
- [17] WAN H L, CAI W, WANG F, et al. High-quality monolayer graphene for bulk laser mode-locking near 2 μm [J]. *Opt. Quant. Electron.*, 2016, 48(1):11.
- [18] 孙锐, 令维军, 陈晨, 等. 2 089 nm 调 Q 锁模 Tm, Ho: CaYAlO₄ 激光器 [J]. *发光学报*, 2020, 41(3):301-307.
SUN R, LING W J, CHEN C, et al. Passively Q-switched mode-locked Tm, Ho: CaYAlO₄ laser operating at 2 089 nm [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(3):301-307. (in Chinese)
- [19] WANG Y C, XIE G Q, XU X D, et al. SESAM mode-locked Tm: CALGO laser at 2 μm [J]. *Opt. Mater. Express*, 2016, 6(1):131-136.
- [20] 孙锐, 陈晨, 令维军, 等. 基于氧化石墨烯的瓦级调 Q 锁模 Tm: LuAG 激光器 [J]. *物理学报*, 2019, 68(10):104207-1-8.
SUN R, CHEN C, LING W J, et al. Watt-level passively Q-switched mode-locked Tm: LuAG laser with graphene oxide

- saturable absorber [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2019, 68(10):104207-1-8. (in Chinese)
- [21] COLUCELLI N, GALZERANO G, GATTI D, *et al.* Passive mode-locking of a diode-pumped Tm: GdLiF₄ laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2010, 101(1-2):75-78.
- [22] WANG Y C, ZHAO Y G, PAN Z B, *et al.* 78 fs SWCNT-SA mode-locked Tm: CLNGG disordered garnet crystal laser at 2 017 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2018, 43(17):4268-4271.
- [23] FUSARI F, LAGATSKY A A, JOSE G, *et al.* Femtosecond mode-locked Tm³⁺ and Tm³⁺-Ho³⁺ doped 2 μm glass lasers [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(21):22090-22098.
- [24] WANG Y, SHEN D Y, CHEN H, *et al.* Highly efficient Tm: YAG ceramic laser resonantly pumped at 1 617 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36(23):4485-4487.
- [25] GLUTH A, WANG Y C, PETROV V, *et al.* GaSb-based SESAM mode-locked Tm: YAG ceramic laser at 2 μm [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(2):1361-1369.
- [26] MA J, XIE G Q, ZHANG J, *et al.* Passively mode-locked Tm: YAG ceramic laser based on graphene [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2015, 21(1):50-55.
- [27] LIU P, JIN L, LIU X, *et al.* A diode-pumped dual-wavelength Tm, Ho: YAG ceramic laser [J]. *IEEE Photonics J.*, 2016, 8(5):1504007-1-7.
- [28] ANTIPOV O L, NOVIKOV A A, ZAKHAROV N G, *et al.* Efficient 2.1-μm lasers based on Tm³⁺: Lu₂O₃ ceramics pumped by 800-nm laser diodes [J]. *Phys. Status Solidi C*, 2013, 10(6):969-973.
- [29] LAGATSKY A A, ANTIPOV O L, SIBBETT W. Broadly tunable femtosecond Tm: Lu₂O₃ ceramic laser operating around 2 070 nm [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(17):19349-19354.
- [30] XU X D, HU Z W, LI D Z, *et al.* First laser oscillation of diode-pumped Tm³⁺-doped LuScO₃ mixed sesquioxide ceramic [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(13):15322-15329.
- [31] 令维军, 夏涛, 董忠, 等. 基于 WS₂ 可饱和吸收体的调 Q 锁模 Tm, Ho: LLF 激光器 [J]. *物理学报*, 2017, 66(11):114207-1-6.
- LING W J, XIA T, DONG Z, *et al.* Passively Q-switched mode-locked Tm, Ho: LLF laser with a WS₂ saturable absorber [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2017, 66(11):114207-1-6. (in Chinese)
- [32] LI Z Y, ZHANG B T, YANG J F, *et al.* Diode-pumped simultaneously Q-switched and mode-locked Nd: GdVO₄/LBO red laser [J]. *Laser Phys.*, 2010, 20(4):761-765.



张明霞(1971 -), 女, 甘肃天水人, 硕士, 副教授, 2009 年于陕西师范大学获得硕士学位, 主要从事波动光学和超快激光技术方面的研究。
E-mail: yuanzhenxx@gmail.com



董忠(1967 -), 男, 湖北武汉人, 学士, 教授, 硕士研究生导师, 1988 年于西北师范大学获得学士学位, 主要从事超快激光技术方面的研究。
E-mail: dz0212@foxmail.com



令维军(1968 -), 男, 甘肃天水人, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 2006 年于中国科学院物理研究所获得博士学位, 主要从事超快激光技术方面的研究。
E-mail: wjlings@sina.com