



2 089 nm调Q锁模Tm, Ho:CaYAlO₄激光器

孙锐, 令维军, 陈晨, 董忠, 袁振, 许强, 张亚妮

引用本文:

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 Rui, LING Wei-jun, CHEN Chen, et al. Passively Q-switched Mode-locked Tm, Ho: CaYAlO₄ Laser Operating at 2 089 nm[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(3): 301–307.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/fgxb20204103.0301>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于多层石墨烯可饱和吸收体的被动调Q HoYAG激光器

Passively Q-switched HoYAG Laser with Multilayer Graphene-based Saturable Absorber

发光学报. 2016, 37(6): 696–700 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163706.0696>

基于微纳光纤-单壁碳纳米管可饱和吸收体的被动调Q掺镱光纤激光器

Passively Q-switched Yb³⁺-doped Fiber Laser Based on Microfiber-single Wall Carbon Nanotube Saturable Absorber

发光学报. 2017, 38(5): 630–635 <https://doi.org/10.3788/fgxb20173805.0630>

基于金纳米棒可饱和吸收体的被动调Q掺铒光纤激光器

Passively Q-switched Er-doped Fiber Lasers by Using Gold Nanorods as Saturable Absorbers

发光学报. 2013, 34(12): 1631–1635 <https://doi.org/10.3788/fgxb20133412.1631>

应用于2.1 μm激光的Tm³⁺/Ho³⁺共掺氟碲酸盐微结构光纤研究

Tm³⁺/Ho Co-doped Fluorotellurite Microstructure Fiber for 2.1 μm Lasing

发光学报. 2016, 37(1): 74–80 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163701.0074>

全固态被动调Q皮秒激光技术研究进展

Research Progress of All-solid-state Passively Q-switched Picosecond Laser Technology

发光学报. 2013, 34(7): 900–910 <https://doi.org/10.3788/fgxb20133407.0900>

文章编号: 1000-7032(2020)03-0301-07

2 089 nm 调 Q 锁模 Tm, Ho: CaYAlO₄ 激光器

孙 锐^{1,2}, 令维军^{1*}, 陈 晨^{1,2}, 董 忠¹, 袁 振¹, 许 强², 张亚妮²

(1. 天水师范学院 激光技术研究所, 甘肃 天水 741001; 2. 宝鸡文理学院 物理与光电技术学院, 陕西 宝鸡 721016)

摘要: 首次采用氧化石墨烯可饱和吸收体作为锁模启动元件在 Tm, Ho: CaYAlO₄ 激光器中实现了稳定的被动调 Q 锁模运转。在 3% 输出耦合镜下, Tm, Ho: CaYAlO₄ 固体激光器获得了最低为 293 mW 的连续光出光阈值。在腔内引入氧化石墨烯可饱和吸收体后, 当吸收抽运功率增大到 1 859 mW 时, Tm, Ho: CaYAlO₄ 激光器进入稳定的调 Q 锁模运转状态。当抽运功率达到 3 W 时, 获得中心波长为 2 089 nm、斜效率为 10.1%、对应最大输出功率为 213 mW 的被动调 Q 锁模脉冲, 重复频率为 100 MHz, 调 Q 包络中锁模脉冲的调制深度接近 100%。

关键词: Tm, Ho: CaYAlO₄ 激光器; 被动调 Q 锁模; 氧化石墨烯; 可饱和吸收体

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20204103.0301

Passively Q-switched Mode-locked Tm, Ho: CaYAlO₄ Laser Operating at 2 089 nm

SUN Rui^{1,2}, LING Wei-jun^{1*}, CHEN Chen^{1,2}, DONG Zhong¹, YUAN Zhen¹, XU Qiang², ZHANG Ya-ni²

(1. Institute of Laser Technology, Tianshui Normal University, Tianshui 741001, China;

2. Institute of Physics and Optoelectronics Technology, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721016, China)

* Corresponding Author, E-mail: wjlings@sina.com

Abstract: Employing graphene oxide as a saturable absorber, we experimentally demonstrated a passively Q-switched mode-locked (QML) operation of a Tm, Ho: CaYAlO₄ bulk laser. In this case, the absorbed threshold power of Tm, Ho: CaYAlO₄ bulk laser was measured as 293 mW by using a 3% output coupler. When the absorption pumping power reached 1 859 mW, it entered a stable Q-switched mode-locked operation state. And when the pumping power reached 3 W, the corresponding maximum output power is 213 mW, corresponding to a slope efficiency of 10.1%, the central wavelength of 2 089 nm, the repetition frequency of 100 MHz, and the modulation depth being close to 100%.

Key words: Tm, Ho: CaYAlO₄ laser; passively Q-switched mode-locked; graphene oxide; saturable absorber

1 引 言

全固态红外激光器由于高输出功率和优异的

光束质量被广泛应用于各个领域^[1-5], 尤其是 2 μm 波段的超快激光因其光谱对应生物分子“指纹”区域, 成为近几年超快激光领域的研究热点。

收稿日期: 2019-12-06; 修订日期: 2020-01-13

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB045200); 国家自然科学基金(11774257, 61564008, 11647008, 11504416); 天水师范学院研究生创新引导项目(TYCX1901)资助
Support by National Key R&D Program of China(2017YFB045200); National Natural Science Foundation of China(11774257, 61564008, 11647008, 1504416); Tianshui Normal University Postgraduate Innovation Guidance Project(TYCX1901)

被动锁模技术是目前获得 2 μm 超快激光的主要手段,因此探索合适的锁模材料显得尤为重要。最近在 2 μm 波段的超快固体激光器的相关报道中,一批具有优良性能的二维纳米材料,如过渡金属硫化物(TMDs)、碳纳米管(CNTs)、氧化石墨烯(GO)等被证实在近中红外波段超快激光器中具有广泛的应用前景。其中,碳纳米管具有较高的化学稳定性、弛豫时间相对较短、造价低廉利于大规模生产等优点,基于碳纳米管的 2 μm 超快固体激光目前最高输出功率为 240 mW^[6-8]。基于过渡金属硫化物的 2 μm 固体激光器最大输出功率也达到了 500 mW^[9-11]以上,虽然过渡金属硫化物具有调制深度大、稳定性好等优点,但目前主要通过机械剥离法来制备,样品面积普遍较小不利于大规模生产。

与碳纳米管和过渡金属硫化物相比,氧化石墨烯是通过热剥离等方法从氧化石墨中获得的。氧化石墨烯材料具有恢复时间短、宽带吸收及损伤阈值高等优点,并且由于表面大量含氧官能团的存在,相较于其他材料更有利于锁模器件的制备^[12],从 2009 年便开始了作为锁模启动元件的研究,但研究大都集中在 1 μm 波段。通过在 Nd:YVO₄ 激光器腔内引入氧化石墨烯,在 2013 年就已经实现了瓦级以上的连续锁模输出^[13]。2015 年,Zhu 等通过氧化石墨烯可饱和吸收体在 Yb:Y₂SiO₅ 激光器中获得了脉宽 763 fs 的连续锁模信号^[14]。Wang 等利用氧化石墨烯在 Nd:GGG 晶体中实现了最高输出功率 408 mW 的调 Q 运转,脉冲宽度为 237 ns^[15]。到 2018 年,Ahmad 等实现了中心波长 1 555.7 nm、脉冲宽度 1.18 ps 的连续锁模运转^[16]。而 2 μm 固体激光的报道很少,Zhang 等利用氧化石墨烯在 Tm,Y:CaF₂ 晶体中实现了调 Q 运转^[17]。2019 年,本课题组在 Tm:LuAG 激光器中通过氧化石墨烯实现了调 Q 锁模运转^[18]。

晶体 CaYAlO₄(CYA)是一种通过提拉法生长的优良激光介质基质材料。由于 CYA 属于钙钛矿型结构,因此与其他钙钛矿型晶体类似,是一种理想的激光基质^[19-20]。而掺杂有 Tm³⁺ 和 Ho³⁺ 离子的 Tm,Ho:CaYAlO₄,具有较高的吸收效率和较宽的调谐宽度,并且其可吸收光谱波长范围较广,吸收峰主要有 691,797,1 212,1 694 nm^[21]。目前该晶体的相关锁模报道较少,仅 Zhao 等在 2018

年通过半导体可饱和吸收镜实现了 Tm,Ho:CaYAlO₄ 的 87 fs 连续锁模运转^[22]。但半导体可饱和吸收镜也同时存在着制造工艺相对复杂、造价十分昂贵等问题。所以探索更廉价高效的锁模材料显得尤为重要。

我们采用传统的 X 型五镜腔,通过在腔内引入自制的 GO 可饱和吸收体,首次在 Tm,Ho:CaYAlO₄ 激光器中实现了稳定的调 Q 锁模运转。采用 3% 输出镜时,将泵浦功率逐步提高到最大 3 W 时,获得的最大锁模输出功率为 213 mW,对应的锁模脉冲的重复频率为 100 MHz,输出锁模脉冲中心波长 2 089 nm,调制深度接近 100%。

2 氧化石墨烯可饱和吸收体的制备

首先需要制备氧化石墨烯溶液,将纯度为 99.9%

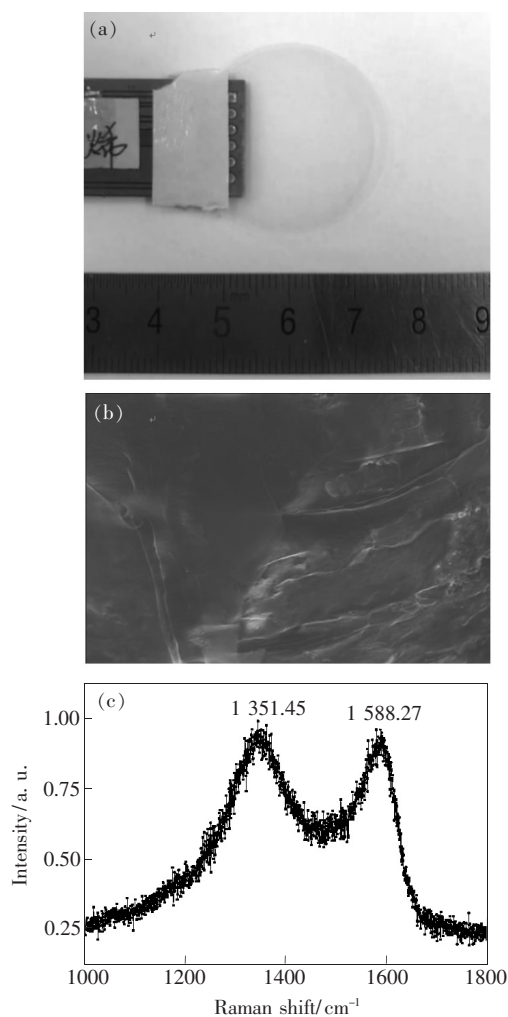


图 1 氧化石墨烯可饱和吸收体的实物图(a)、电镜图(b)及拉曼光谱(c)。

Fig. 1 Photo(a), SEM(b) and Raman spectrum(c) of the GO-Sas.

的氧化石墨烯粉末以 0.3 mg/mL 的比例加入去离子水中,然后超声处理 600 min,再将超声处理完毕的溶液放入离心机中以 3 000 r/min 的转速进行约 10 min 的离心处理,获得氧化石墨烯溶液。为了使可饱和吸收材料能在固体激光器中更方便地安装,需要将材料附着在石英片上制成可饱和吸收体,因此需要制备亲水石英片以固定可饱和吸收材料。将双氧水与浓硫酸以 3:1 的比例混合均匀并将用去离子水清洗干净的石英片放入溶液中静置,直至表面再无气泡产生时取出晾干,获得亲水石英片。最后在氧化石墨烯溶液中垂直放入亲水石英片并且静置,直到氧化石墨烯溶液完全蒸发,此时氧化石墨烯已经附着在石英片表面。完成上述工艺后,氧化石墨烯可饱和吸收体制备完成。图 1(a) 为氧化石墨烯可饱和吸收体的实物图。图 1(b)、(c) 为氧化石墨烯可饱和吸收体表面电镜图及拉曼光谱。从图 1(b) 可以看到可饱和吸收体存在层状结构,从图 1(c) 可以看出,在 $1\ 351.45\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 588.27\ \text{cm}^{-1}$ 处有两个特征峰 E_{2g}^1 和 A_{1g} ,由此可以确认该氧化石墨烯可饱和吸收体已经剥离出少层结构^[23-24]。

3 实验装置

如图 2 所示为 Tm, Ho: CaYAlO₄ 被动锁模激光器的实验装置,谐振腔选用的是典型的 X 型五镜腔结构,抽运源为最高输出功率 3 W、可调谐获得 800 nm 左右近红外光的可调谐掺钛蓝宝石激光器。激光晶体为 Tm, Ho: CaYAlO₄, 晶体内铥离子(Tm^{3+})和钬离子(Ho^{3+})的掺杂浓度分别为 6% 和 0.5%,晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 4 mm,吸收峰为 798 nm,端面为布儒斯特角切割。为了控制晶体的热透镜效应,保证激光器稳定运转,需要冷却激光晶体。使用薄导热金属箔将激光晶体完全包裹住仅保留两个通光面,再将包裹好的晶体夹持紫铜冷却夹具内,并在冷却夹具内通入恒温循环水对夹具进行冷却,恒温水设定维持在 12 °C 左右。为了防止低温下水冷夹表面出现冷凝水珠,我们将实验室温度保持在 20 °C,湿度维持在 30% 左右。对抽运光波长高透的聚焦透镜(L)焦距 $f = 150\ \text{mm}$,对抽运光透过率大于 95%。图中 M1、M2 选用的是 Layertec 公司生产的 2 μm 泵浦镜,曲率半径分别为 100 mm 和 75 mm,对抽运激光高透,透过率大于 95%,对 2 μm 振荡光反射率大于 99.9%。由 ABCD 矩阵计算

模拟振荡光斑,可得到在晶体中振荡光斑大小约为 58 μm,与经聚焦透镜聚焦后的 31 μm 的抽运光斑比值接近于 0.5,理论上抽运光与振荡光形成了良好的匹配,可以获得较高的输出效率以及更低的输出阈值。实验中使用的氧化石墨烯可饱和吸收体损伤阈值约为 $750\ \mu\text{J}/\text{cm}^2$,为保证吸收体的正常运行需要保持表面能量密度低于其损伤阈值。M3 选用曲率半径为 100 mm 的平凹反射镜,对 2 μm 振荡光高反,反射率大于 99.9%,M4 是平面反射镜,对 2 μm 振荡光反射率大于 99.9%。氧化石墨烯可饱和吸收体位于 M3 的焦点附近,由 ABCD 矩阵计算模拟振荡光斑在可饱和吸收体表面的振荡光斑约为 163.6 μm。M5 为输出耦合镜(Output coupler, OC),对振荡光部分透过,本实验共选用了透过率为 1.5% 和 3% 两种规格的输出镜。M6 和 M7 为平面高反镜,对抽运光高反,反射率大于 99.9%。

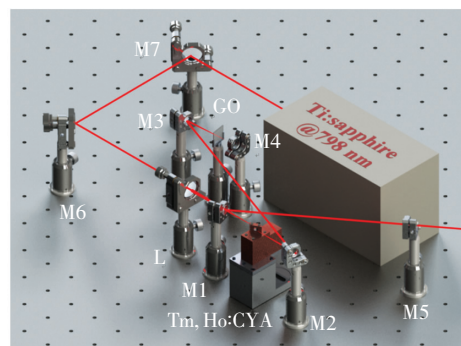


图 2 Tm, Ho: CaYAlO₄ 被动调 Q 锁模激光实验装置
Fig. 2 Experimental setup of the passively Q-switched mode locked Tm, Ho: CaYAlO₄ laser

4 分析与讨论

采用图 2 光路设计获得如图 3(a) 所示数据,由实验数据发现, Tm, Ho: CaYAlO₄ 晶体拥有较高的泵浦光吸收效率,并且激光器的运转状态影响该晶体的泵浦光吸收效率。当锁模激光器处于非运转状态时, Tm, Ho: CaYAlO₄ 晶体对抽运光的吸收效率约为 89.7%;当实现连续光运转时,由于激光运转状态下会快速消耗晶体内部的反转粒子数,使得晶体吸收效率提高,激光晶体的吸收效率达到了 95.5% 左右。当 Tm, Ho: CaYAlO₄ 激光器引入氧化石墨烯可饱和吸收体、处于被动调 Q 锁模运转时,激光晶体的吸收效率变化不大,仍然保持在 95.5% 左右。

如图 3(b) 所示,当激光器处于连续光(CW)

运转状态时,首先选用 1.5% 输出耦合镜,通过逐步调高抽运功率测得此时该谐振腔的出光阈值是

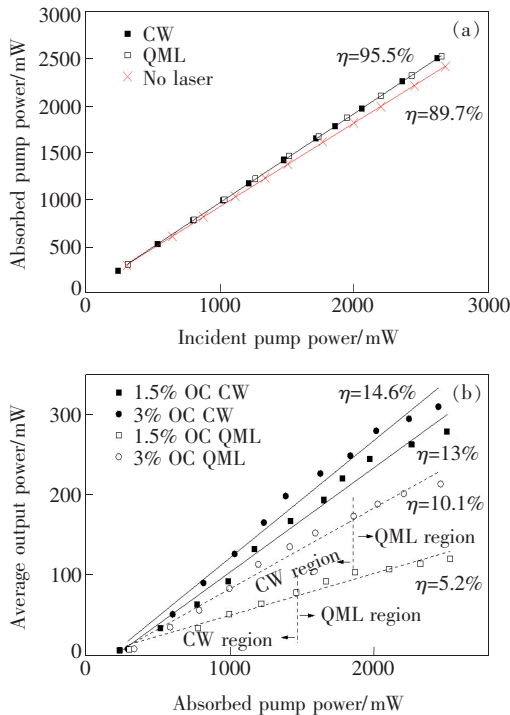


图 3 实验数据图。(a)晶体吸收功率与入射抽运功率的关系;(b)连续光平均输出功率和调 Q 锁模功率与吸收抽运功率的关系。

Fig. 3 Experimental data diagram. (a) Crystal absorbed power versus the incident pump power. (b) Average output power of continuous wave and Q-switched mode locked versus the absorbed pump power.

表 1 不同激光运转状态下的激光输出参数

Tab. 1 Data of different laser operation

Operating state	Output coupler	Light threshold power/ mW	Lock mode threshold power/ mW	Average output power/ mW	Slope efficiency/ %	Crystal absorption efficiency/ %
No laser	/	/	/	/	/	89.7
CW	1.5%	238	/	278	13.0	95.5
	3%	293	/	309	14.6	
QML	1.5%	305	1 461	120	5.2	95.5
	3%	339	1 859	213	10.1	

如图 4 所示为吸收抽运功率为 2.5 W 时的锁模光谱,光谱图数据由 AVANTES 生产的 AvaSpecNIR256-2.5TEC 光谱分析仪采集获得,由实验数据图可以得到锁模激光器输出的锁模脉冲的中心波长为 2 089 nm,光谱的半高宽 $\Delta\lambda$ 为 14 nm。图 5 是显示在 RIGOL 生产的 DS4024 数字

238 mW;当抽运功率达到最大 3 W 时,获得最高输出功率为 278 mW,对应的斜效率为 13%。之后换成 3% 输出耦合镜,出光阈值提升至 293 mW,最高抽运功率下对应的最高输出功率达到 309 mW,谐振腔斜效率提高到 14.6%。当在平面反射镜 M4 前引入氧化石墨烯可饱和吸收体之后,首先选用 1.5% 的输出镜,通过逐步调高抽运功率测得此时该谐振腔的出光阈值提升至 305 mW;当再逐步提升抽运功率使晶体吸收抽运功率达到 1 461 mW 时,此时氧化石墨烯可饱和吸收体上对应功率密度约为 $194.28 \mu\text{J}/\text{cm}^2$,激光器进入稳定的调 Q 锁模运转状态;最后提升抽运功率到最大值 3 W 时,激光器获得最大输出功率为 120 mW,斜效率为 5.2%。之后换成 3% 输出耦合镜,此时谐振腔的出光阈值提升到 339 mW;当吸收抽运功率达到 1 859 mW 时,氧化石墨烯可饱和吸收体上对应功率密度约为 $215.45 \mu\text{J}/\text{cm}^2$,激光器再次进入稳定的调 Q 锁模运行状态;再提升抽运功率达到最大值 3 W 时,激光器最大输出功率为 213 mW,斜效率为 10.1%。由表 1 的实验数据可知,在保证实现调 Q 锁模的前提下;选用 3% 输出镜,激光器可以获得更高的输出效率;选用 1.5% 输出镜,激光器可以获得更低的阈值。所以我们在调 Q 锁模运转时可以根据需求选用合适的输出耦合镜。

示波器上的调 Q 锁模脉冲序列图,示波器带宽为 200 MHz,探测器为 EOT 生产的快速光电二极管 (ET-5000)。数字示波器所选扫描时间分别为 1 ms、100 μs 和 10 ns。其中图 5(b) 中的调 Q 包络的宽度约为 14 μs ,调 Q 包络的重复频率为 71.43 kHz,在调 Q 包络下的锁模脉冲频率为 100 MHz,

经计算锁模脉冲频率符合 1.5 m 腔长所对应的理论重复频率, 锁模脉冲的调制深度接近 100%。

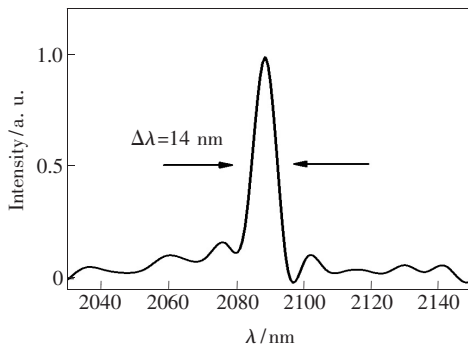


图4 吸收抽运功率为 2.5 W 的锁模光谱

Fig. 4 Emission spectrum of the mode locking laser

由于调 Q 包络的存在影响了利用自相关仪 Pulse check 150 获取锁模脉冲自相关曲线的准确性, 所以没能获得准确的脉冲自相关信号。并且由于调 Q 锁模的锁模脉冲宽度远大于自相关仪的脉冲测量上限 35 ps, 因此需要利用公式

$$t_m = \sqrt{t_r^2 + t_p^2 + t_0^2}, \quad (1)$$

根据示波器锁模信号估算锁模脉冲的宽度^[25]。实验中测得锁模脉冲的上升沿时间 $t_m \approx 1.8$ ns, 光电探测器自身的上升沿时间 $t_p = 35$ ps, 又因为对于示波器自身的上升沿时间 t_0 有

$$t_0 \times W_B = 0.35 \sim 0.4, \quad (2)$$

其中 W_B 为示波器的带宽, 由此可估算得到实验中的 t_0 在等式右侧取值为 0.35 时为 1.75 ns, 再根据实际脉冲宽度与实际上升沿时间的关系, 可以估算出该脉冲的实际锁模脉冲宽度约为 524.81 ps。

参 考 文 献:

- [1] LIU X M, HAN D D, SUN Z P, *et al.*. Versatile multi-wavelength ultrafast fiber laser mode-locked by carbon nanotubes [J]. *Sci. Rep.*, 2013, 3:2718.
- [2] 刘学胜, 杨松, 司汉英, 等. 1 J 高光束质量免水冷脉冲 Nd: YAG 激光器 [J]. *发光学报*, 2019, 40(12):1523-1530. LIU X S, YANG S, SI H Y, *et al.*. High beam quality water-free pulsed Nd: YAG laser with output energy 1 J [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019, 40(12):1523-1530. (in Chinese)
- [3] SOROKIN E, SOROKINA I T, MANDON J, *et al.*. Sensitive multiplex spectroscopy in the molecular fingerprint 2.4 μ m region with a Cr²⁺: ZnSe femtosecond laser [J]. *Opt. Express*, 2007, 15(25):16540-16545.
- [4] DUAN X M, CHEN C, DING Y, *et al.*. Widely tunable middle infrared optical parametric oscillator pumped by the Q-switched Ho: GdVO₄ laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2018, 35(5):054205.
- [5] 吴春婷, 姜妍, 戴通宇, 等. 2 μ m 掺钬固体激光器研究进展 [J]. *发光学报*, 2018, 39(11):1584-1597.

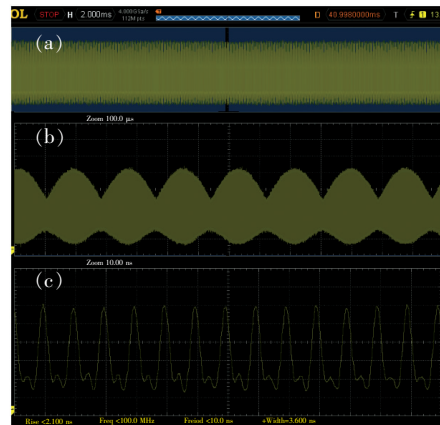


图5 扫描时间为 2 ms (a)、100 μ s (b) 及 10 ns (c) 的锁模脉冲序列图。

Fig. 5 Mode-locked pulse trains at 2 ms (a), 100 μ s (b) and 10 ns (c).

5 结 论

本实验采用氧化石墨烯可饱和吸收体, 首次在 Tm, Ho: CaYAlO₄ 激光器中实现了调 Q 锁模运转。在 3% 输出耦合镜下, 该激光腔出光阈值为 339 mW, 逐渐提高抽运功率, 当吸收抽运功率达到 1 859 mW 时, Tm, Ho: CaYAlO₄ 激光器进入稳定的调 Q 锁模运行状态。当抽运功率达到 3 W 时, 获得中心波长为 2 089 nm、斜效率为 10.1%、对应最大输出功率为 213 mW 的被动调 Q 锁模脉冲, 锁模脉冲的重复频率为 100 MHz, 调制深度接近 100%。实验结果证明 GO 可以作为 2 μ m 波段 Tm³⁺、Ho³⁺ 共掺 CaYAlO₄ 固体激光器被动调 Q 锁模的快速启动元件, 具有潜在的开发应用价值。后期通过进一步优化可饱和吸收体、控制腔内色散将有可能获得更窄的脉冲宽度。

- WU C T,JIANG Y,DAI T Y,*et al.*. Research progress of 2 μm Ho-doped solid-state laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018, 39(11):1584-1597. (in Chinese)
- [6] LIU J,WANG Y G,QU Z S,*et al.*. 2 μm passive *Q*-switched mode-locked Tm^{3+} : YAP laser with single-walled carbon nanotube absorber [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2012,44(4):960-962.
- [7] MARTINEZ A,FUSE K,XU B,*et al.*. Optical deposition of graphene and carbon nanotubes in a fiber ferrule for passive mode-locked lasing [J]. *Opt. Express*, 2010,18(22):23054-23061.
- [8] CHO W B,SCHMIDT A,YIM J H,*et al.*. Passive mode-locking of a Tm-doped bulk laser near 2 microm using a carbon nanotube saturable absorber [J]. *Opt. Express*, 2009,17(13):11007-11012.
- [9] ZHANG H,LU S B,ZHENG J,*et al.*. Molybdenum disulfide (MoS_2) as a broadband saturable absorber for ultra-fast photonics [J]. *Opt. Express*, 2014,22(6):7249-7260.
- [10] XIA H W,LI M,LI T,*et al.*. Few-layered MoS_2 as a saturable absorber for a passively *Q*-switched Er: YAG laser at 1.6 μm [J]. *Appl. Opt.*, 2017,56(10):2766-2770.
- [11] LIN H F,ZHU W Z,XIONG F B,*et al.*. MoS_2 -based passively *Q*-switched diode-pumped Nd: YAG laser at 946 nm [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2017,91:36-39.
- [12] 杨永岗,陈成猛,温月芳,等. 氧化石墨烯及其与聚合物的复合 [J]. 新型炭材料, 2008,23(3):193-200.
YANG Y G,CHEN C M,WEN Y F,*et al.*. Oxidized graphene and graphene based polymer composites [J]. *New Carbon Mater.*, 2008,23(3):193-200. (in Chinese)
- [13] FENG C,WANG Y G,LIU J,*et al.*. 3 W high-power laser passively mode-locked by graphene oxide saturable absorber [J]. *Opt. Commun.*, 2013,298-299:168-170.
- [14] ZHU H T,CAI W,WEI J F,*et al.*. 763 fs Passively mode-locked Yb: Y_2SiO_5 laser with a graphene oxide absorber mirror [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2015,68:120-123.
- [15] WANG B B,SONG Q,GAO C C,*et al.*. Compact passively *Q*-switched Nd: GGG laser with antimony telluride-graphene oxide as saturable absorber [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2018,105:41-44.
- [16] AHMAD H B,SOLTANI S,THAMBIRATNAM K,*et al.*. Highly stable mode-locked fiber laser with graphene oxide-coated side-polished D-shaped fiber saturable absorber [J]. *Opt. Eng.*, 2018,57(5):056110.
- [17] ZHANG C,LIU J,FAN X W,*et al.*. Compact passive *Q*-switching of a diode-pumped Tm,Y: CaF_2 laser near 2 μm [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2018,103:89-92.
- [18] 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):104207-1-6.
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):104207-1-6. (in Chinese)
- [19] KONG L C,QIN Z P,XIE G Q,*et al.*. Dual-wavelength synchronous operation of a mode-locked 2 μm Tm: CaYAlO_4 laser [J]. *Opt. Lett.*, 2015,40(3):356-358.
- [20] 唐睿,高子叶,吴正茂,等. 基于 SESAM 被动调 *Q* 的激光二极管泵浦 Yb: CaYAlO_4 脉冲激光器 [J]. 中国光学, 2019,12(1):167-178.
TANG R,GAO Z Y,WU Z M,*et al.*. Output characteristics of diode-pumped passively *Q*-switched Yb: CaYAlO_4 pulsed laser based on a SESAM [J]. *Chin. Opt.*, 2019,12(1):167-178. (in Chinese)
- [21] DI J Q,ZHOU D H,XU X D,*et al.*. Spectroscopic properties of Tm, Ho: CaYAlO_4 single crystal [J]. *Cryst. Res. Technol.*, 2014,49(7):446-451.
- [22] ZHAO Y G,WANG Y C,ZHANG X Z,*et al.*. 87 fs mode-locked Tm, Ho: CaYAlO_4 laser at ~ 2.043 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2018,43(4):915-918.
- [23] SHAO G L,LU Y G,WU F F,*et al.*. Graphene oxide: the mechanisms of oxidation and exfoliation [J]. *J. Mater. Sci.*, 2012,47(10):4400-4409.
- [24] ZENG H L,LIU G B,DAI J F,*et al.*. Optical signature of symmetry variations and spin-valley coupling in atomically thin tungsten dichalcogenides [J]. *Sci. Rep.*, 2013,3:1608.
- [25] 令维军,孙锐,陈晨,等. 基于反射式 MoS_2 可饱和吸收体调 *Q* 锁模 Tm: LuAG 激光器 [J]. 中国激光, 2019,46(8):0808002-1-6.

LING W J, SUN R, CHEN C, *et al.*. Passively Q-switched mode-locked Tm: LuAG laser with reflective MoS₂ saturable absorber [J]. *Chin. J. Lasers*, 2019, 46(8): 0808002-1-6. (in Chinese)



孙锐(1994 -),男,河南信阳人,硕士研究生,2015年于黄河科技学院获得学士学位,主要从事超快激光技术的研究。

E-mail: sun0302@outlook.com



令维军(1968 -),男,甘肃武山人,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