

调Q锁模运转的全固态Tm:LuAG陶瓷激光器

陈晨 许强 孙锐 张亚妮 康翠萍 张明霞 袁振 令维军

Q-switched mode-locked all-solid-state Tm:LuAG ceramic laser

Chen Chen, Xu Qiang, Sun Rui, Zhang Ya'ni, Kang Cuiping, Zhang Mingxia, Yuan Zhen, Ling Weijun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20190563>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

调Q和调Q锁模脉冲共存双波长光纤激光器

Coexistence of Q-switched and Q-switched mode-locking pulse dual-wavelength fiber laser

红外与激光工程. 2019, 48(8): 805009–0805009(8) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0805009>

双SESAM被动锁模超短脉冲光纤激光器

Double SESAM passively mode-locked ultrashort pulse fiber laser

红外与激光工程. 2018, 47(5): 505002–0505002(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0505002>

2 μm波段Tm:YAP晶体半导体可饱和吸收镜连续波锁模激光器

CW mode-locked Tm: YAP laser with semiconductor saturable-absorber mirror at around 2 μm

红外与激光工程. 2018, 47(5): 505003–0505003(4) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0505003>

调Q锁模类噪声方波脉冲掺铒光纤激光器

Q-switched mode-locking noise-like rectangular pulses erbium-doped fiber laser

红外与激光工程. 2018, 47(8): 803009–0803009(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0803009>

石墨烯锁模的全保偏光纤激光器

All-polarization-maintaining fiber laser mode-locked by graphene

红外与激光工程. 2017, 46(10): 1005004–1005004(8) <https://doi.org/10.3788/IRLA201755.1005004>

用于气溶胶雷达的高能量全固态Nd:YAG调Q激光器

High energy all solid state Nd:YAG Q-switched laser for aerosol lidar

红外与激光工程. 2020, 49(S2): 20200304–20200304 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200304>

调 Q 锁模运转的全固态 Tm:LuAG 陶瓷激光器

陈 晨^{1,2,3}, 许 强^{1,3*}, 孙 锐^{1,2}, 张亚妮^{1,4}, 康翠萍¹, 张明霞², 袁 振², 令维军²

(1. 宝鸡文理学院 物理与光电技术学院, 陕西 宝鸡 721016;

2. 天水师范学院 激光技术研究所, 甘肃 天水 741001;

3. 宝鸡市超快激光和新材料工程技术研究中心, 陕西 宝鸡 721016;

4. 陕西科技大学 文理学院, 陕西 西安 710021)

摘 要: 采用垂直生长法制备的氧化石墨烯(Graphene oxide, GO)作为可饱和吸收体,利用典型“X”型折叠腔在全固态 Tm:Lu₃Al₅O₁₂(Tm:LuAG)陶瓷激光器中实现了调 Q 锁模运转。以 790 nm 激光二极管(Laser diode, LD)作为泵浦源,当泵浦功率大于 8 W 时,激光器进入稳定的调 Q 锁模状态。当输出镜透过率为 5% 时,连续光最高输出功率为 714 mW,斜效率为 4.94%。当泵浦达到 16 W 时,激光器最大输出功率为 200 mW,光谱中心波长为 2024 nm,脉冲宽度约为 695 ps,对应的锁模脉冲重复频率为 108.7 MHz,调 Q 包络中锁模脉冲的调制深度接近 100%。该 2 μm 超短脉冲激光器在生物医学和激光通讯等领域具有非常重要的应用。

关键词: Tm:LuAG 陶瓷激光器; 氧化石墨烯可饱和吸收体; 调 Q 锁模; 调制深度

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20190563

Q-switched mode-locked all-solid-state Tm:LuAG ceramic laser

Chen Chen^{1,2,3}, Xu Qiang^{1,3*}, Sun Rui^{1,2}, Zhang Ya'ni^{1,4}, Kang Cuiping¹,
Zhang Mingxia², Yuan Zhen², Ling Weijun²

(1. Institute of Physics and Optoelectronics Technology, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721016, China;

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

3. Baoji Engineering Technology Research Center on Ultrafast Laser and New Materials, Baoji 721016, China;

4. School of Arts and Sciences, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: Using graphene oxide (GO) by vertical growth method as saturable absorber, an all-solid-state Q-switched mode-locked Tm: Lu₃Al₅O₁₂ (Tm: LuAG) ceramic laser with typical 'X' folded cavity was firstly demonstrated. A 790 nm laser diode (LD) was used as the pumping source. When the pumping power was greater than 8 W, the laser entered a stable Q-switched mode-locked state. When the output mirror was 5%, the maximum output power of continuous light was 714 mW, and the oblique efficiency was 4.94%. When the pumping power reached 16 W, the maximum output power of the laser was 200 mW, the corresponding repetition frequency of mode-locked pulse was 108.7 MHz, and the modulation depth of mode locked pulse in Q-switched envelope was close to 100%. The 2 μm ultrashort pulsed laser has important applications in biomedicine and laser communication.

收稿日期:2019-12-10; 修订日期:2020-02-04

基金项目:国家自然科学基金(11774257, 61564008, 11647008, 11504416); 陕西省国际科技合作与交流计划项目(2021KW-39); 宝鸡市重大科技专项计划项目(2015CXNL-1-3); 天水市科技支撑计划自然科学基金项目(2018-FZJHK-3392); 天水师范学院研究生创新引导项目(TYCX1901)

Key words: Tm:LuAG ceramic laser; graphene oxide saturable absorber; Q-switched mode-locking; modulation depth

0 引言

固体激光器的调 Q 锁模运转具有较高的峰值功率和脉冲能量,已应用于生物医疗、材料微加工、表面工程、太赫兹光学和激光雷达^[1-2]等重要领域。2 μm 波段的激光处于水分子的吸收峰,其在人眼手术和激光测距等方面具有重要的应用价值^[3-4]。适用于 2 μm 波段的锁模技术主要包含主动锁模和被动锁模。主动锁模技术由于受限于光开关的速度导致难以获得更短量级的脉冲宽度。因此,一般采用被动锁模技术获得超短激光脉冲,该技术是借助可饱和吸收体来完成的,具有操作简易、成本低廉的优点。其中调 Q 锁模处于调 Q 运转到锁模运转的过渡状态,因输出脉冲具有大脉冲能量和高峰值功率特性在远程探测中具有特殊的应用价值。

半导体可饱和吸收镜 (Semiconductor saturable absorber mirror, SESAM)^[5-6] 为常用的锁模器件,但其造价较高,制作工艺较为复杂。因此,需要寻找基于新型材料的可饱和吸收体。石墨烯材料具有成本低廉、饱和强度较低和零带隙的特点,其中零带隙导致了其光谱对波长不敏感,适用于从可见光到中红外的激光工作^[7-9]。石墨烯材料在 1 μm 波段的激光中作为锁模启动元件被广泛使用。山东师范大学利用石墨烯材料分别在 Yb:Sc₂SiO₅^[10]、Yb:Y₂SiO₅^[11] 和 Yb,Y:CaF₂^[12] 激光器中得到了锁模运转。Xu 等人在 Nd:GdVO₄ 激光器中添加液相剥离法制备的石墨烯可饱和吸收镜,获得了输出平均功率为 360 mW、脉冲宽度 16 ps 和单脉冲能量为 8.4 nJ 的激光^[13]。Zhao 等人于 erbium-doped 光纤激光器中加入 GO-SA,得到中心波长为 1560.80 nm 和脉冲宽度为 2.5 ps 的锁模激光运转^[14]。石墨烯材料在 2 μm 波段也得到关注。Ma 等人在 Tm:CLNGG 晶体中实现 729 fs 和 98.7 MHz 的连续锁模脉冲激光输出^[15]; Max-Born 研究所利用 Tm:MgWO₄ 晶体得到最大功率 39 mW 和最窄脉冲宽度 96 fs 的激光输出^[16]。与石墨烯相比,氧化石墨烯能够在稀碱水和纯水中被分散出来,从而形成的胶状悬浮液较为稳定。这是因为它拥有良好的表面活性与润湿性能,并且其表面拥有丰富的亲水性酸性官能团^[17]。氧化石

墨烯有着超快的恢复时间和宽带可饱和吸收特性,更稳定且易于制备。目前,在 1 μm 波段处的有关氧化石墨烯可饱和吸收体 (Graphene oxide saturable absorbable, GO-SA) 的研究报道较为集中。Zhu 等人在 Yb:Y₂SiO₅ 激光器中获得了 763 fs 的激光脉冲,在 1059 nm 波段的最大输出功率为 700 mW^[18]。Zhang 等人采用 GO-SA 在 YVO₄/Nd:YVO₄/YVO₄ 激光器中实现了稳定的调 Q 锁模运转^[19]。但是在 2 μm 波段处有关 GO-SA 的应用较少。笔者所在课题组在 Tm,Ho;LLF 激光器中采用氧化石墨烯实现了低阈值的调 Q 锁模运转^[20]。

LuAG 材料比常规的 YAG 材料更加的坚固,拥有更高的损伤阈值^[21]。因此,其在 2 μm 波段的激光中获得了广泛的关注。山东大学使用 SESAM 在 Tm:LuAG 激光器中获得了脉冲宽度分别为 38 ps^[22] 和 13.6 ps^[23] 的锁模激光输出。由于陶瓷激光材料生长周期较短、尺寸较大、掺杂浓度高和成本较低等特点,使其成为继晶体和玻璃材料之后又一个值得关注的激光增益介质。Yan 等人在平凹腔型结构中,利用二极管泵浦 Nd:LuAG 陶瓷激光器获得最大输出功率为 1.37 W 的连续光^[24]。Zhou 等人在 Tm:LuAG 陶瓷激光器中得到输出功率为 2.64 W 的连续光,并且使用 Cr:ZnSe 可饱和吸收体得到调 Q 运转^[25]; Wang 等人在 Tm:LuAG 陶瓷激光器中加入 SESAM 获得脉冲宽度为 2.7 ps 和最大输出功率为 232 mW 的激光输出^[26]。

激光二极管具有结构紧凑、光束质量好和成本较低等优点^[27]。采用激光二极管作为泵浦源,首次利用 GO 作为可饱和吸收体实现了 Tm:LuAG 陶瓷激光器稳定的调 Q 锁模运转,在 2024 nm 波段得到最大输出功率为 200 mW 和重复频率为 108.7 MHz 的激光输出, Q 包络中锁模脉冲调制深度接近于 100%。

1 实验装置

Tm:LuAG 陶瓷激光器的调 Q 锁模实验装置如图 1 所示 (实验装置图通过 Solidworks 软件绘制而成)。泵浦源为 790 nm 的 LD,最高输出功率为 30 W。

实验中采用掺杂铥离子 (Tm³⁺) 浓度为 6% 以及尺寸为 3 mm×2.8 mm×5 mm 的 Tm:LuAG 陶瓷材料为增益介质。使用过程中需要沿着其布儒斯特角进行切割, 并且对它的通光面进行抛光处理。为了降低 Tm:LuAG 陶瓷材料的热透镜效应, 采用恒温水循环冷却系统冷却夹在紫铜热沉内的激光陶瓷介质, 水的温度在 11 ℃ 左右。LD 泵浦的聚焦系统缩束比为 1 : 0.8, 透过率为 95%, 工作距离为 49.2 mm, 外径大小为 37.5 mm。激光谐振腔采用 X 型五镜腔, 其中 M1 和 M2 分别是曲率半径为 75 mm 和 100 mm 的平凹镜。M1 和 M2 对 790 nm 波长的抽运光具有高透性, 对 1800~2100 nm 波段激光的反射率大于 99.9%。M3 为对 1800~2050 nm 波段激光高反的平凹镜, 曲率半径为 100 mm。其作用主要是聚焦激光脉冲到 GO 上启动锁模运转。M4 为对 1800~2050 nm 波段反射率大于 99.9% 的平面高反镜。实验装置采用的输出镜透过率分别为 3%、5% 和 9%。

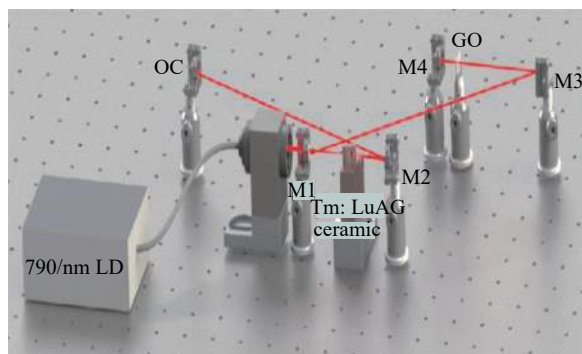


图 1 实验装置原理图

Fig.1 Experimental device schematic

2 实验结果与分析

按照上述实验装置图进行实验设计。连续光和调 Q 锁模输出功率随泵浦功率变化的关系如图 2 所示。选取透过率分别为 3%、5% 和 9% 的输出耦合镜, 当腔内未加入氧化石墨烯可饱和吸收体时, 实现连续光运转, 出光阈值分别为 716 mW, 939 mW 和 1311 mW, 对应的斜效率为 4.63%, 4.94% 和 4.35%; 当泵浦功率为 16 W 时, 最大输出功率为 680 mW, 714 mW 和 620 mW。为了获得最佳输出透过率, 首先在理论上进行了模拟, 其中谐振腔最佳透过率与泵浦功率之间的关系如公式 (1) 所示^[28-29]:

$$T = \sqrt{\frac{4\sigma\tau_f\lambda_p P_{in}[1 - \exp(-\alpha_p L)] \times \delta_0}{\pi h c (\bar{W}_p^2 + W_0^2)}} - \delta_0 \quad (1)$$

式中: σ 为晶体发射截面; τ_f 为发射寿命; λ_p 为泵浦光波长; P_{in} 为泵浦功率; α_p 吸收系数; L 为晶体长度; δ_0 为腔内损耗; \bar{W}_p 为平均泵浦光斑半径; W_0 为振荡光斑半径。通过模拟公式 (1) 得到图 3 的曲线图, 从图中可以看出在泵浦功率为 16 W 时, 谐振腔的最佳透过率 $T=0.045$ 。因此, 考虑到光学玻璃镀膜在加工中的实际情况, 所以选取透过率为 0.05 的输出镜较为合适。

将 GO-SA 加入激光腔中, 选取透过率为 3% 的输出耦合镜, 和连续光运转情况相比, 它的出光阈值提

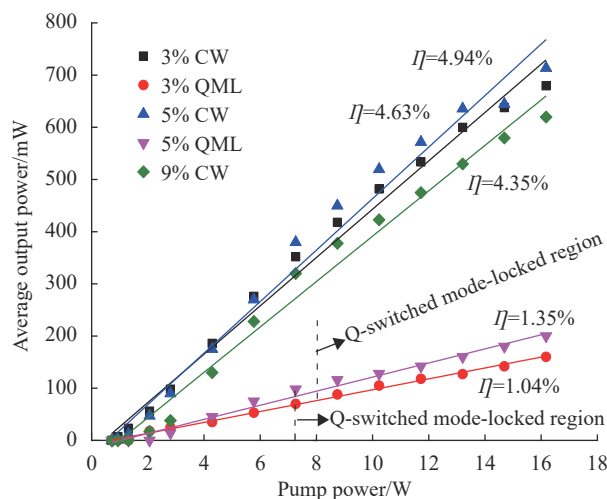


图 2 谐振腔最佳透过率随泵浦功率变化图

Fig.2 Optimal cavity transmittance versus pump power

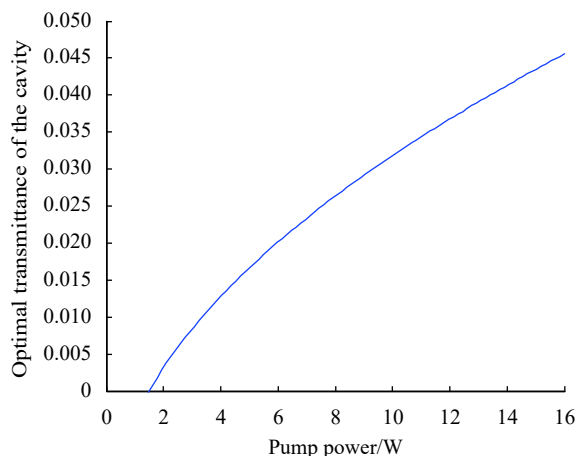


图 3 连续光和锁模输出功率随泵浦功率变化图

Fig.3 The average output power of continuous wave and mode locking versus the pump power

高到 1.68 W。当泵浦功率达到 7.24 W 时进入稳定调 Q 锁模运转,此时输出功率为 68 mW,氧化石墨烯可饱和吸收体表面光斑半径约为 160 μm,计算可饱和吸收体表面功率密度约为 25.94 μJ/cm²。继续增加泵浦功率,当泵浦功率达到 16 W 时,最大输出功率为 160 mW,斜效率为 1.04%。在 5% 输出耦合镜下的出光阈值为 2.05 W,当泵浦功率达到 8 W 时,实现了稳定的调 Q 锁模运转,输出功率为 104 mW,经过计算可饱和吸收体表面功率密度约为 23.8 μJ/cm²,输出的最大功率为 200 mW,斜效率为 1.35%。而当输出镜为 9% 时腔内功率密度不足,无法实现调 Q 锁模。通过以上数据分析可知,当输出镜为 5% 时,拥有较高的输出功率与斜效率。因此,在调 Q 锁模运转中使用 5% 的输出镜,相信,通过不断优化激光腔体结构来获得较高功率的连续锁模运转。

实验的调 Q 锁模脉冲光谱通过 (AvaSpec-NIR256-2.5 TEC) 分析仪来获得。由图 4 可知,测量出来的脉冲信号的半高宽 Δλ 为 11 nm,中心波长为 2024 nm。

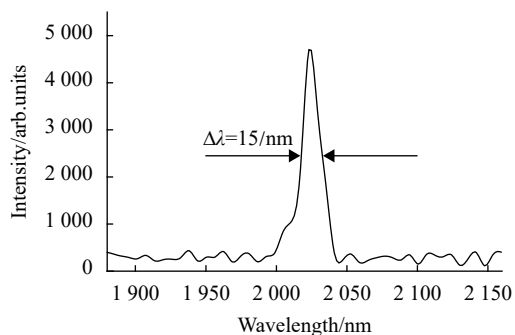


图 4 锁模光谱图

Fig.4 The emission spectrum of the mode locking laser

图 5 为锁模脉冲序列图。实验使用数字示波器 (RIGOL, DS4034) 来测量调 Q 锁模脉冲序列。当扫描时间分别为 2 ms、100 μs 和 10 ns 时,重复频率为 108.7 MHz。调 Q 锁模脉冲的调制深度接近 100%。

由于调 Q 锁模脉冲无法通过自相关仪直接去测量,因此利用以下公式理论上对 Q 包络中的锁模脉冲宽度进行估算^[30]:

$$t_m = \sqrt{t_p^2 + t_r^2 + t_o^2} \quad (2)$$

式中: t_m 、 t_p 、 t_r 和 t_o 分别为实验中测量出来的锁模脉冲

上升沿时间、光电二极管探测器的上升沿时间、锁模脉冲实际的上升沿时间以及数字示波器的上升沿时间。

根据公式:

$$t_o \times W_B = 0.35 \sim 0.4 \quad (3)$$

式中: 示波器的带宽 W_B 为 200 MHz, 根据公式 (3) 计算得到 t_o 为 1 900 ps。实验中测得的 t_m 约为 1 980 ps, t_p 约为 35 ps。将数据代入公式 (2) 可得锁模脉冲的实际上升沿时间 t_r 为 556 ps, 由于脉冲宽度约为 t_r 的 1.25 倍, 所以实验中的调 Q 锁模脉冲宽度大约为 695 ps。

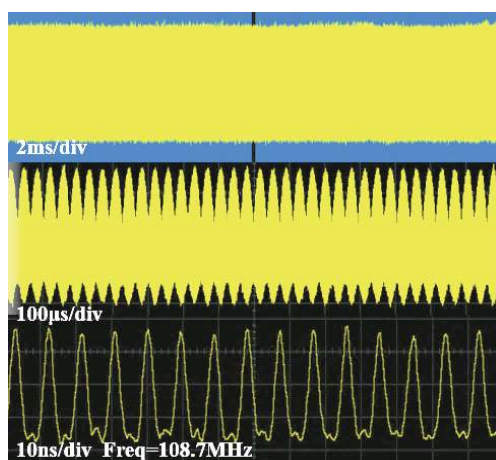


图 5 锁模脉冲序列

Fig.5 Mode-locked pulse trains

3 结 论

实验采用垂直生长法生长的氧化石墨烯作为可饱和吸收体。利用该吸收体,结合典型的“X”型五镜折叠腔,在 Tm:LuAG 陶瓷激光器首次实现了调 Q 锁模运转。选择 5% 的输出镜时,连续光最高输出功率为 714 mW,斜效率为 4.94%。将 GO-SA 加入腔内,激光进入稳定调 Q 锁模运转状态的阈值功率为 8 W。增加泵浦功率达到 16 W 时,在 2024 nm 的中心波长处得到 200 mW 的最大输出功率以及 1.35% 的斜效率。重复频率和最大单脉冲能量分别为 108.7 MHz 和 1.84 nJ。研究表明,氧化石墨烯可以作为 2 μm 固体激光器的被动调 Q 锁模器件。后期,将通过提高泵浦功率,改善可饱和吸收体的质量,优化谐振腔的参数,争取获得高功率的连续锁模运转。

参考文献:

- [1] Lu Xianyang, Li Xuebin, Qin Wubin, et al. Retrieval of horizontal distribution of aerosol mass concentration by micro pulse lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(7): 1697-1704. (in Chinese)
- [2] Zeng Haomin, Li Song, Zhang Zhiyu, et al. Risley-prism-based beam scanning system for mobile lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(7): 1444-1450. (in Chinese)
- [3] Chen Y P, Zhai J P, Xu X T, et al. Mode-locked thulium-doped fiber laser based on 0.3 nm diameter single-walled carbon nanotubes at 1.95 μm [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(4): 041403.
- [4] Wang Caili, Xie Shiyong, Liu Hui, et al. Theoretical study 2 μm Tm:YAG laser with wavelength switchable accurately for lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0830003. (in Chinese)
- [5] Ling W J, Xia T, Dong Z, et al. Passively mode-locked Tm, Ho:LLF laser at 1895 nm [J]. *Journal of Optics*, 2019, 48(2): 209-213.
- [6] Wang Y C, Xie G Q, Xu X D, et al. SESAM mode-locked Tm:CALGO laser at 2 μm [J]. *Optical Materials Express*, 2015, 6(1): 131-136.
- [7] Tan W D, Su C Y, Knize R J, et al. Mode locking of ceramic Nd: yttrium aluminum garnet with graphene as a saturable absorber [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(3): 031106.
- [8] Popa D, Sun Z, Torrisi F, et al. Sub 200 fs pulse generation from a graphene mode-locked fiber laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(20): 203106.
- [9] Cizmeciyan M N, Kim J W, Bae S, et al. Graphene mode-locked femtosecond Cr: ZnSe laser at 2500 nm [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(3): 341.
- [10] Wei C, Jiang S, Xu S, et al. Graphene saturable absorber for diode pumped Yb: Se_2SiO_5 mode-locked laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 65: 1-4.
- [11] Zhu H T, Zhao L, Jie L, et al. Monolayer graphene saturable absorber with sandwich structure for ultrafast solid-state laser [J]. *Optical Engineering*, 2015, 55(8): 081304.
- [12] Zhu H T, Liu J, Jiang S Z, et al. Diode-pumped Yb, Y: CaF_2 laser mode-locked by monolayer graphene [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 75: 83-86.
- [13] Xu Jinlong, Li Xianlei, Wu Yongzhong, et al. Graphene saturable absorber mirror for ultra-fast-pulse solid-state laser [J]. *Optics letters*, 2011, 36(10): 1948-1950.
- [14] Zhao C, Huang Q Q, Mohammed A A, et al. Observation of chaotic polarization attractors from a graphene mode locked soliton fiber laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(2): 60-64.
- [15] Ma J, Xie G Q, Lv P, et al. Graphene mode-locked femtosecond laser at 2 μm wavelength [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 2085-2087.
- [16] Wang Y C, Chen W D, Mero M, et al. Sub-100 fs Tm: MgWO_4 laser at 2017 nm mode locked by a graphene saturable absorber [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(16): 3076-3079.
- [17] Cheng Chen, Wei Jiafeng, Liu Bowen, et al. Experiment of mode-locked laser using graphene oxide [J]. *Physics Experimentation*, 2014(1): 1-4. (in Chinese)
- [18] 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]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 68: 120-123.
- [19] Zhang G, Wang Y G, Chen Z D, et al. Graphene oxide based reflective saturable absorber for Q-switched and mode-locked $\text{YVO}_4/\text{Nd: YVO}_4/\text{YVO}_4$ laser [J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(5): 055505.
- [20] Ling Weijun, Xia Tao, Dong Zhong, et al. Passively Q-switched mode-locked low threshold Tm, Ho:LiLuF₄ laser with a graphene Oxide saturable absorber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0301006. (in Chinese)
- [21] Beil K, Fredrich-Thornton S T, Tellkamp F, et al. Thermal and laser properties of Yb: LuAG for kW thin disk lasers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(20): 20712-20722.
- [22] Feng T, Yang K, Zhao J, et al. 1.21 W passively mode-locked Tm: LuAG laser [J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11819-11825.
- [23] Yang K J, Luan C, Zhao S Z, et al. Diode-pumped mode-locked Tm: LuAG 2 μm laser based on GaSb-SESAM[C]//The European Conference on Lasers and Electro-Optics, Optical Society of America, 2017: CAP 27.
- [24] Yan D Y, Liu P, Xu X D, et al. Eye-safe Nd: LuAG ceramic lasers [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(4): 1374-1380.
- [25] Zhou Z Y, Huang X X, Guan X F, et al. Continuous-wave and passively Q-switched Tm^{3+} -doped LuAG ceramic lasers [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(9): 3441-3447.
- [26] Wang Y C, Lan R J, Mateos X, et al. Thulium doped LuAG ceramics for passively mode locked lasers [J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 7084-7091.
- [27] Hu Xing, Cheng Dejiang, Guo Zhiyan, et al. Highly efficient RTP electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser by end-pumping at 914 nm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0105001. (in Chinese)
- [28] Paolo M B. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1991, 27(10): 2319-2326.
- [29] Feng Y, Song F, Zhao L J, et al. Upconversion in Nd: YVO₄ crystal under LD pump and its influence [J]. *Acta Physica*

Sinica, 2001, 50(2): 335-360.

- [30] 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 Physics*, 2010, 20(4): 761-765.



第一作者简介：陈晨 (1993-), 男, 光学工程师, 硕士, 主要从事超短激光脉冲产生、放大方面的研究。参与国家重点专项项目 1 项, 国家自然科学基金项目 2 和横向项目 1 项, 发表研究论文 8 篇, 申请 1 项

国家发明专利。



通讯作者简介：许强 (1980-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事激光技术方面的研究。国家公派英国访问学者, 首批“横渠学者”杰出人才, 陕西省光学学会理事、中国电动力学学会会员、陕西省物理学会

会员。主持国家级、省部级、厅局级和横向项目 10 余项, 在 SCI、EI 源期刊发表论文 50 余篇, 出版专著 2 部, 申请国家发明专利 4 项, 研究成果先后获得地市级以上奖励 9 项。



导师简介：令维军 (1968-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事超短激光脉冲产生、放大方面的研究。中科院西安光机所客座教授, 甘肃省电子科学与技术重点学科负责人, 甘肃省物理学会常务理事,

天水师范学院激光技术研究所所长。2005 中国科学院物理研究所获博士学位, 先后在中科院瞬态光学与光子技术国家重点实验和韩国浦项工大亚洲阿秒中心做博士后工作, 日本东京大学访问学者, 主持国家级项目 6 项, 在 SCI、EI 源期刊发表论文 80 余篇, 出版专著 2 部, 获得中国科学院杰出科技成就奖 (集体奖), 北京市科技进步奖和甘肃高校科技进步奖和中科院所长表彰奖等。