

# 基于氧化石墨烯可饱和吸收体的低阈值被动调 Q 锁模 Tm, Ho:LiLuF<sub>4</sub> 激光器

令维军<sup>1</sup>, 夏涛<sup>1</sup>, 董忠<sup>1\*</sup>, 左银艳<sup>1</sup>, 李可<sup>1</sup>, 刘勍<sup>1</sup>, 路飞平<sup>1</sup>, 王勇刚<sup>2</sup>

<sup>1</sup>天水师范学院激光技术研究所, 甘肃 天水 741001;

<sup>2</sup>陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710062

**摘要** 利用垂直生长法制备的氧化石墨烯(GO)作为可饱和吸收体,结合特殊设计的低阈值谐振腔,在 Tm, Ho:LiLuF<sub>4</sub>全固态激光器中实现了低阈值被动调 Q 锁模运转。出光阈值功率低至 73 mW,稳定锁模阈值功率为 663 mW,对应 GO 可饱和吸收体上功率密度为 76.4 μJ·cm<sup>-2</sup>。典型的调 Q 脉冲包络重复频率为 104.2 kHz,脉宽约为 30 μs,包络下锁模脉冲序列的重复频率为 178.6 MHz,调制深度接近 100%。

**关键词** 激光器;低阈值;Tm, Ho:LiLuF<sub>4</sub>激光器;氧化石墨烯;调 Q 锁模;可饱和吸收体

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0301001

## Passively Q-switched Mode-Locked Low Threshold Tm, Ho:LiLuF<sub>4</sub> Laser with a Graphene Oxide Saturable Absorber

Ling Weijun<sup>1</sup>, Xia Tao<sup>1</sup>, Dong Zhong<sup>1</sup>, Zuo Yinyan<sup>1</sup>, Li Ke<sup>1</sup>, Liu Qing<sup>1</sup>,  
Lu Feiping<sup>1</sup>, Wang Yonggang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Laser Technology, Tianshui Normal University, Tianshui, Gansu 741001, China;

<sup>2</sup>School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China

**Abstract** We demonstrate a stable, low threshold, passive Q-switched mode-locked Tm, Ho:LiLuF<sub>4</sub> solid-state laser with the graphene oxide (GO) prepared by vertical growth method as a saturable absorber and the special designed low threshold resonant cavity. The output power of the laser is as low as 73 mW, the stable mode-locked threshold power is 663 mW, and the corresponding power density of the GO saturable absorber is 76.4 μJ·cm<sup>-2</sup>. Typical Q-switched pulse envelope has a repetition frequency of 104.2 kHz and a pulse width of 30 μs. The repetition frequency of mode-locked pulse sequence is 178.6 MHz, and the modulation depth is close to 100%.

**Key words** lasers; low threshold; Tm, Ho:LiLuF<sub>4</sub> laser; graphene oxide; Q-switched mode-locked; saturable absorber

**OCIS codes** 140.3430; 140.3295; 160.3380; 140.4050

## 1 引 言

超短激光脉冲产生一直是全固态激光热点研究方向之一。这种脉冲尺度为皮秒和飞秒量级的激光在军事、超精细加工、医疗、雷达等领域具有非常大的应用潜力,尤其是 2 μm 波段激光,处于人眼安全区域和大气窗口波段,市场应用潜力巨大<sup>[1-4]</sup>。通过

可饱和吸收体实现被动锁模是超快激光器研究的一个重要手段。目前应用最广泛且最成熟的可饱和吸收体为半导体可饱和吸收镜 (SESAM),通过 SESAM 实现锁模的报道中 2 μm 波段激光非常多。但 SESAM 因受材料能隙宽度的限制,对工作波长要求苛刻,操作带宽狭窄,且制造工艺非常复杂,成本昂贵,因此必须寻找新的材料来代替 SESAM。

收稿日期: 2017-09-15; 收到修改稿日期: 2017-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(61465012,61564008,11774257,61461046,61665010)、国家重点研发计划(2017YFB045200)

作者简介: 令维军(1968—),男,博士,教授,主要从事超短激光脉冲产生、放大方面的研究。E-mail: wjlingts@sina.com

\* 通信联系人。E-mail: dz0212@foxmail.com

近年来,过渡金属硫化物(TMDs)、石墨烯为代表的二维零带隙纳米材料已被证实可以用作近中红外波段超快激光器的可饱和吸收体材料<sup>[5-6]</sup>,目前该材料在光纤激光器中应用广泛<sup>[7-8]</sup>,而在全固态激光器中应用相对较少。2004年,Novoselov等首次用机械剥离出了具有单层结构的2D石墨稀材料,其优越的物理化学特性被人们赋予“神奇材料”的称号,在高速电子设备、光学材料、能量产生及存储、传感器等领域应用广泛。2009年,石墨烯材料因其制作成本低、恢复时间短、宽带吸收特性及支持高功率等优点开始在研究中用做可饱和吸收体。2016年,Wan等<sup>[9]</sup>在Tm:YAP全固态激光器中利用石墨烯实现稳定的锁模运转。2017年,Wang等<sup>[10]</sup>在Tm:MgWO<sub>4</sub>全固态激光器中利用石墨烯实现86 fs的锁模运转,也是迄今为止2 μm波段全固态激光器获得的最短脉冲。

氧化石墨烯(GO)作为石墨烯的派生物,比石墨烯更具竞争优势,由于其表面带有大量亲水性酸性官能团,具有良好的润湿性能和表面活性,从而使其能够在稀碱水和纯水中分散而形成稳定的胶状悬浮液,相对于石墨烯,其在水溶液中的分散效果更好<sup>[11]</sup>。且制备成本更低廉、原料易得,原料利用率更高,非常适合做可饱和吸收体。该吸收体在1 μm波段的报道较多。2013年,Feng等<sup>[12]</sup>利用氧化石墨烯可饱和吸收体(GO-SAs)在Nd:YVO<sub>4</sub>晶体中实现输出最大功率为3.06 W的8.8 ps锁模运转。2015年,Zhu等<sup>[13]</sup>利用GO-SAs在Yb:Y<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>晶体中实现最短763 fs锁模运转。2 μm波段的相关报道很少,目前只有Liu等<sup>[14]</sup>利用GO-SAs在Tm:YAlO<sub>3</sub>晶体中实现锁模运转。

抽运源为自行搭建的钛宝石激光器,选择该抽运源的原因是其波长在720~850 nm可调,该波段基本涵盖掺Tm<sup>3+</sup>或Tm<sup>3+</sup>、Ho<sup>3+</sup>共掺激光晶体的其中一个或多个吸收峰。从而一台抽运源可以研究2 μm波段掺Tm<sup>3+</sup>或Tm<sup>3+</sup>、Ho<sup>3+</sup>共掺不同激光晶

体的特性,也为今后选择合适的LD抽运以及2 μm波段激光器市场化提供可靠的参考和指导。低阈值激光器可以有效降低抽运光的功率,从而大大节省激光器的成本,为激光谐振腔的设计提供思路,并且具有一定的学术意义和应用价值。所选择的晶体为Tm, Ho:LiLuF<sub>4</sub>激光晶体,相对于其他基质材料,该晶体的声子能量系统相对较低、吸收系数小、激光阈值和上变频损耗低等优点<sup>[15]</sup>。2017年,本课题组已经利用WS<sub>2</sub>在该晶体中实现锁模运转,选用传统X型谐振腔(折叠镜凹面曲率半径为100 mm),得到连续光出光阈值为143 mW<sup>[16]</sup>。

本文从传统的X型谐振腔出发,通过减小聚焦透镜焦距且在谐振腔内选用不同凹面曲率半径的抽运镜,最终将输出连续光的出光阈值功率降低至52 mW。利用自制的GO-SAs,在Tm, Ho:LiLuF<sub>4</sub>全固态激光器中实现了低阈值被动调Q锁模运转,出光阈值低至73 mW,稳定调Q锁模阈值为663 mW。典型的调Q脉冲包络重复频率为104.2 kHz,脉宽约为30 μs,包络下锁模脉冲序列的重复频率为178.6 MHz,调制深度近100%。

## 2 氧化石墨烯可饱和吸收体材料的制备

GO-SAs材料采用垂直生长法制备。1) 将浓硫酸和双氧水按1:3混合,混合均匀后将石英片放入其中,直致石英片表面不再产生气泡,取出晾干,得到亲水处理的石英片;2) 将GO粉末置于去离子水中,超声10 h左右,然后进行离心处理,制备出0.3 mg/mL的GO溶液;3) 将GO溶液注入一个聚苯乙烯方盒中,将亲水处理过的石英片沿对角线垂直放入盒中,静置15天,是静置后的结果,建议用括号括起此内容,取出石英片,GO材料沉积在石英片的两侧,GO-SAs制备完毕,成品如图1(a)所示。

图1(b)为GO-SAs的拉曼光谱和电镜图,电镜图表明GO已均匀依附在石英片表面。拉曼光谱是

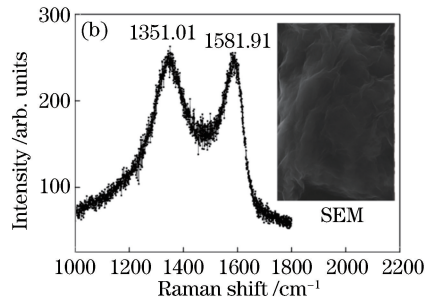
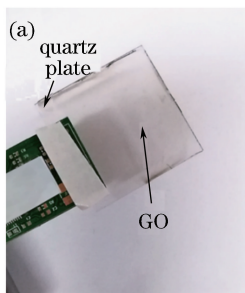


图 1 (a) GO可饱和吸收体;(b) GO-SAs拉曼光谱图和电镜图

Fig. 1 (a) Photo of GO saturable absorber; (b) Raman spectrum and SEM image of GO-SAs

一种无损检测与表征技术,GO 的声子振动模主要有  $E_{2g}^1$ (平面上)及  $A_{1g}$ (平面外),且这两个主要的振动模均随厚度的变化而变化,具体表现为  $E_{2g}$  模发生红移,而  $A_{1g}$  模发生蓝移,图中  $E_{2g}$  和  $A_{1g}$  各自位于拉曼位移  $1351.01\text{ cm}^{-1}$  和  $1581.91\text{ cm}^{-1}$  处。根据这两个特征峰值,可以估算出 GO 纳米片的层数,可以看出,GO 确实被剥离出少层结构<sup>[17-19]</sup>。

### 3 低阈值锁模实验装置

GO-SAs 锁模实验装置如图 2 所示,实验中增益介质为端面布儒斯特角切割并抛光的 Tm, Ho:LiLuF<sub>4</sub> 激光晶体,尺寸为  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ ,采用  $8\text{ }^\circ\text{C}$  恒温循环水冷却,掺杂离子浓度分别为 5% 和 0.5% Tm<sup>3+</sup> 和 Ho<sup>3+</sup>。抽运源为自行搭建的全固态可调谐的掺钛蓝宝石激光器,典型的 Z 型谐振腔。不同于 LD 抽运,该抽运源光束质量好,聚焦到激光晶体中心的束腰半径小。通过仔细调节双折射滤光片,将中心波长调至  $780.5\text{ nm}$ ,光谱宽度为  $1\text{ nm}$ ,对应晶体在  $720\sim 850\text{ nm}$  的最强吸收峰,

最大程度地提高增益介质对抽运光的利用率,有利于降低激光阈值。

为获得低阈值激光输出,抽运光和振荡光在晶体中心模式匹配十分重要。为此引入抽运系数来表征振荡光与抽运光的匹配,定义抽运系数为  $K = \omega_{po}/\omega_{co}$ ,其中  $\omega_{po}$  和  $\omega_{co}$  分别为抽运光与振荡光的束腰半径。理论上,当抽运系数  $K = 0.5$  时,获得最佳模式匹配<sup>[20-21]</sup>。实验中聚焦透镜  $L_2$  的焦距  $f = 100$ ,计算得到抽运光在晶体中心的束腰半径为  $16\text{ }\mu\text{m}$  左右,利用 ABCD 矩阵理论模拟晶体中振荡光的束腰半径,传统 X 型谐振腔(折叠镜  $M_9-M_{10}$  曲率半径  $r = 100\text{ mm}$ )下晶体中心振荡光束腰半径约为  $49\text{ }\mu\text{m}$ ,对应的抽运系数  $K = 0.32$ ;为了获得更低的阈值,采用  $M_9-M_{10}$  曲率半径分别为  $50\text{ mm}$  和  $75\text{ mm}$ ,对应的振荡光束腰半径约为  $26\text{ }\mu\text{m}$ ,对应的抽运系数为  $K = 0.61$ ,数值更接近最佳抽运系数。故后者更易获得最佳模式匹配,实现高效率低阈值激光运转。折叠镜对抽运光透射率大于 95%,对输出光反射率大于 99.9%, $M_{11}$  为输出镜,聚焦平凹镜  $M_{12}$  和平面高反镜  $M_{13}$  对输出光反射率大于 99.9%, $M_6$  的凹面曲率半径为  $100\text{ mm}$ 。

### 4 实验结果分析与讨论

采用上述低阈值谐振腔进行设计。如图 3(a) 所示,在激光运转和非运转状态下,激光晶体对振荡光的吸收率不同,且当激光处于运转状态时,不同的输出镜对应的晶体吸收效率也略有不同。当腔内无激光运转时,激光晶体的吸收效率为 33.61%。当腔内实现连续光运转时,选用 1.5% 的输出耦合镜,激光晶体的吸收效率为 59.42%,选用 3% 和 5% 的输出耦合镜,激光晶体的吸收效率约为 63.6%。当腔内引入 GO-SAs 时,激光晶体的吸收效率为 57.7%。如图 3(b) 所示,当腔内未插入石墨烯时,1.5%

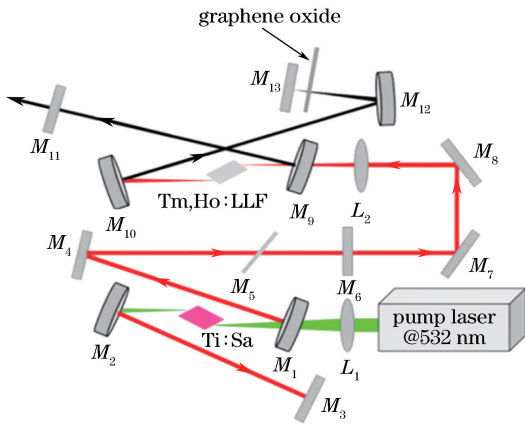


图 2 Tm, Ho:LiLuF<sub>4</sub> 被动锁模激光实验装置图  
Fig. 2 Experimental setup of passively mode-locked Tm, Ho:LiLuF<sub>4</sub> laser

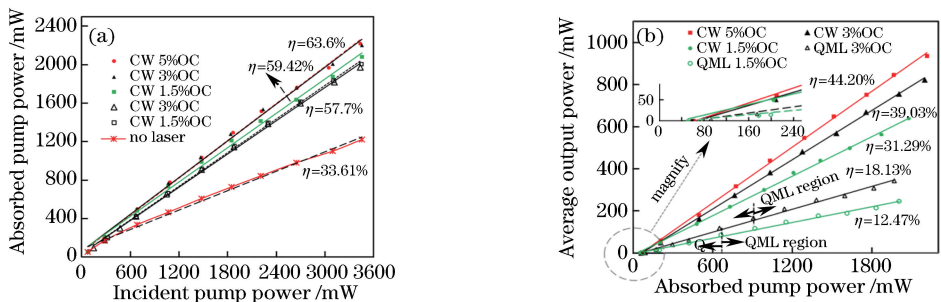


图 3 (a) 晶体吸收效率图; (b) 连续光和锁模输出功率随吸收抽运功率变化图  
Fig. 3 (a) Curves of crystal absorption efficiency; (b) continuous wave and mode-locked output power versus the absorbed pump power

输出镜对应的连续运转出光阈值为 52 mW,斜效率为 31.29%,输出最大功率为 639 mW;腔内插入 GO-SAs,出光阈值增加至 73 mW,当吸收抽运功率大于 663 mW 时,对应 GO-SAs 上功率密度为  $76.4 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ,激光进入稳定的调 Q 锁模运转,最高输出功率为 245 mW,斜效率为 12.47%。选用 3% 输出镜,在未插入 GO-SAs 时,连续出光阈值功率为 59 mW,插入 GO-SAs 后出光阈值功率增加为 92 mW,当吸收抽运功率大于 907 mW 时,对应 GO-SAs 上功率密度为  $74.1 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ,激光进入稳定的调 Q 锁模运转,输出最大功率为 342 mW,斜效率为 18.13%。综合比较可以看出,1.5% 输出镜对应的连续光和锁模阈值功率比较低,但斜效率不高,而 3% 输出镜的连续光和锁模阈值功率稍大于前者,但对应的激光效率比较高,因此可根据不同的激光需求选用输出镜。同时,两者实现调 Q 锁模运转虽然输出的功率不同,但对应 GO-SAs 上功率密度近似相等,这也是孤子锁模运转的一个特征。由于实现连续锁模需要更多的腔内功率密度,目前受限于抽运功率,相信后期提高抽运功率将有望实现连续锁模。

锁模脉冲的光谱通过光谱分析仪(AvaSpec-NIR256-2.5TEC,Avantes,荷兰)测量得到,如图 4 所示,输出调 Q 锁模光的中心波长为 1895 nm,光谱的半峰全宽为 15 nm。通过  $2 \mu\text{m}$  快速光电二极管(ET-5000,EOT,美国)连接 200 MHz 的数字示波器(DS4024,北京普源精电科技有限公司,北京)探测调 Q 锁模脉冲序列。图 5 分别为扫描时间为 1 ms、20  $\mu\text{s}$ 、2  $\mu\text{s}$  和 10 ns 所获得的调 Q 锁模脉冲序列,测得调 Q 包络的脉宽为 30  $\mu\text{s}$ ,重复频率为 104.2 kHz,调 Q 包络下锁模脉冲的频率为 178.6 MHz,锁模脉冲的调制深度接近 100%。

由于调 Q 包络的存在,影响了锁模脉冲自相关曲线的准确测量,所以利用公式  $t_m = \sqrt{t_r^2 + t_p^2 + t_o^2}$

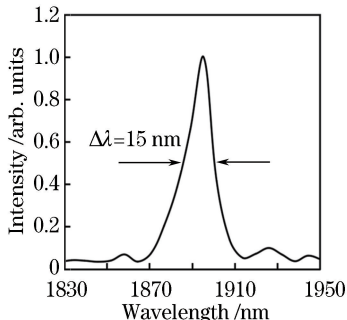


图 4 锁模光谱图

Fig. 4 Spectrum of the mode-locked laser

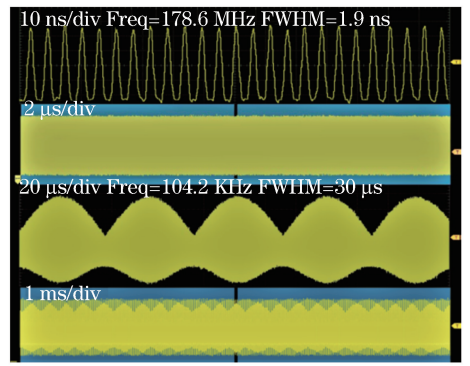


图 5 扫描时间为 (a) 1 ms、(b) 20  $\mu\text{s}$ 、(c) 2  $\mu\text{s}$  和 (d) 10 ns 的锁模脉冲序列

Fig. 5 Mode-locked pulse sequences with (a) 1 ms, (b) 20  $\mu\text{s}$ , (c) 2  $\mu\text{s}$  and (d) 10 ns scanning time

(式中  $t_m$  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,  $t_o$  为示波器上升沿时间)估算锁模脉冲的宽度<sup>[22]</sup>。实验中被测锁模脉冲上升沿时间约 1900 ps,光电探测器上升沿时间为 35 ps,利用  $t_o \times W_B = 0.35 - 0.4$  ( $W_B$  为示波器的带宽,实验中示波器的带宽为 200 MHz)可估算出实验中  $t_o = 1750$  ps,因此可计算出实际锁模脉冲上升沿时间为 739 ps。由于脉冲宽度约等于上升沿时间的 1.25 倍,故实际锁模脉冲宽度约为 924 ps。通过提高抽运功率,优化制作工艺,降低 GO 材料的损耗,有望实现连续锁模脉冲,得到更窄的脉冲宽度。

## 5 结 论

综上所述,利用垂直生长法制备的氧化石墨烯作为可饱和吸收体,结合设计的低阈值激光谐振腔,在  $\text{Tm, Ho:LiLuF}_4$  全固态激光器中实现了低阈值调 Q 锁模运转。在未插入 GO-SAs 时,连续光输出最低阈值功率仅有 52 mW;在腔内插入 GO-SAs 后,连续运转出光阈值功率低至 73 mW,稳定锁模阈值功率为 663 mW。典型的调 Q 脉冲包络重复频率为 104.2 kHz,脉宽约为 30  $\mu\text{s}$ ,包络下锁模脉冲序列的重复频率为 178.6 MHz,调整深度接近 100%。GO 作为石墨烯的派生物,比石墨烯更具竞争优势。制备成本更低廉,原料易得且利用率更高,非常适合作为可饱和吸收体,有望商业化推广。后期将提高抽运光功率,优化 GO 材料的质量,继续优化谐振腔的参数,进一步实现稳定连续锁模运转。

## 参 考 文 献

[1] Wang J, Sramek C, Paulus Y M, *et al.* Retinal

- safety of near-infrared lasers in cataract surgery[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2012, 17(9): 095001.
- [2] van Leeuwen T G, Jansen E D, Motamedi M, *et al.* Excimer laser ablation of soft tissue: a study of the content of rapidly expanding and collapsing bubbles [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 30(5): 1339-1345.
- [3] Sorokin E, Sorokina I T, Mandon J, *et al.* Sensitive multiplex spectroscopy in the molecular fingerprint 2.4  $\mu\text{m}$  region with a  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  femtosecond laser [J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 16540-16545.
- [4] Koopmann P, Lamrini S, Scholle K, *et al.* High power diode pumped 2  $\mu\text{m}$  laser operation of  $\text{Tm}:\text{Lu}_2\text{O}_3$  [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2010: CMDD1.
- [5] Wei C, Shi H X, Luo H Y, *et al.* Research progress of pulsed mid-infrared fiber lasers using two-dimensional materials[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0703009.  
韦晨, 史红霞, 罗鸿禹, 等. 基于二维材料调制的中红外脉冲光纤激光器的研究进展[J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0703009.
- [6] Ling W J, Xia T, Dong Z, *et al.*  $\text{WS}_2$  saturable absorber for passively Q-switched  $\text{Tm, Ho}:\text{LLF}$  lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0703020.  
令维军, 夏涛, 董忠, 等. 基于  $\text{WS}_2$  可饱和吸收体的被动调 Q  $\text{Tm, Ho}:\text{LLF}$  激光器[J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0703020.
- [7] Yang C S, Chen D, Zhao Q L, *et al.* Research progress of 2.0  $\mu\text{m}$ -band  $\text{Tm}$ -doped continuous wave single-frequency fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201006.  
杨昌盛, 陈丹, 赵齐来, 等. 2.0  $\mu\text{m}$  波段掺铥连续单频光纤激光器的研究进展[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201006.
- [8] Liu J, Tan F Z, Liu C, *et al.* Progress on high-power ultrashort-pulsed thulium-doped fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201003.  
刘江, 谭方舟, 刘晨, 等. 高功率超短脉冲掺铥光纤激光器的研究进展[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201003.
- [9] Wan H L, Cai W, Wang F, *et al.* High-quality monolayer graphene for bulk laser mode-locking near 2  $\mu\text{m}$  [J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2016, 48(1): 11.
- [10] Wang Y C, Chen W D, Mero M, *et al.* Sub-100 fs  $\text{Tm}:\text{MgWO}_4$  laser at 2177  $\mu\text{m}$  mode locked by a graphene saturable absorber [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(16): 3076-3079.
- [11] Cheng C, Wei J F, Liu B W, *et al.* Experiment of mode-locked laser using graphene oxide [J]. *Physics Experimentation*, 2014, 34(1): 1-4.  
程晨, 魏加峰, 刘博文, 等. 基于氧化石墨烯的锁模激光实验[J]. *物理实验*, 2014, 34(1): 1-4.
- [12] Feng C, Wang Y G, Liu J, *et al.* 3 W high-power laser passively mode-locked by graphene oxide saturable absorber [J]. *Optics Communications*, 2013, 298/299: 168-170.
- [13] Zhu H T, Cai W, Wei J F, *et al.* 763 fs Passively mode-locked  $\text{Yb}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$  laser with a graphene oxide absorber mirror [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 68: 120-123.
- [14] Liu J, Wang Y G, Qu Z S, *et al.* Graphene oxide absorber for 2  $\mu\text{m}$  passive mode-locking  $\text{Tm}:\text{YAlO}_3$  laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(1): 15-19.
- [15] Qiao L, Yang F G, Wu Y H, *et al.* Theoretical and experimental researches on  $\text{Tm}$  and  $\text{Ho}$  codoped Q-switching laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(21): 214205.  
乔亮, 羊富贵, 武永华, 等.  $\text{Tm, Ho}$  双掺调 Q 激光系统理论与实验研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(21): 214205.
- [16] Ling W J, Xia T, Dong Z, *et al.* Passively Q-switched mode-locked  $\text{Tm, Ho}:\text{LLF}$  laser with a  $\text{WS}_2$  saturable absorber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(11): 114207.  
令维军, 夏涛, 董忠, 等. 基于  $\text{WS}_2$  可饱和吸收体的调 Q 锁模  $\text{Tm, Ho}:\text{LLF}$  激光器[J]. *物理学报*, 2017, 66(11): 114207.
- [17] 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]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1608.
- [18] Mak K F, Lee C, Hone J, *et al.* Atomically thin  $\text{MoS}_2$ : a new direct-gap semiconductor [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(13): 136805.
- [19] Splendiani A, Sun L, Zhang Y, *et al.* Emerging Photoluminescence in Monolayer  $\text{MoS}_2$  [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(4): 1271-1275.
- [20] Ling W J, Zheng J A, Jia Y L, *et al.* Theoretical study of the  $\text{Ti}:\text{sapphire}$  laser with low pump threshold [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(4): 1619-1623.  
令维军, 郑加安, 贾玉磊, 等. 低阈值飞秒钛宝石激光器的理论研究[J]. *物理学报*, 2005, 54(4): 1619-1623.
- [21] Ling W J, Wei Z Y, Sun J H, *et al.* Experimental study of femtosecond  $\text{Ti}:\text{sapphire}$  laser with low-threshold pump [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(9): 4182-4185.  
令维军, 魏志义, 孙敬华, 等. 低阈值掺钛蓝宝石激

光器实验研究 [J]. 物理学报, 2005, 54(9): 4182-4185.

[22] Kong L C, Xie G Q, Yuan P, *et al.* Passive Q-switching and Q-switched mode-locking operations of

2  $\mu\text{m}$  Tm : CLNGG laser with MoS<sub>2</sub> saturable absorber mirror [J]. Photonics Research, 2015, 3(2): A47-A50.