

基于氧化石墨烯的瓦级调Q锁模Tm: LuAG激光器

孙锐 陈晨 令维军 张亚妮 康翠萍 许强

Watt-level passively Q-switched mode-locked Tm: LuAG laser with graphene oxide saturable absorber

Sun Rui Chen Chen Ling Wei-Jun Zhang Ya-Ni Kang Cui-Ping Xu Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 104207 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20182224

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182224>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于WS₂可饱和吸收体的调Q锁模Tm, Ho: LLF激光器

Passively Q-switched mode-locked Tm, Ho:LLF laser with a WS₂ saturable absorber

物理学报. 2017, 66(11): 114207 <https://doi.org/10.7498/aps.66.114207>

基于单壁碳纳米管调Q锁模低阈值Tm,Ho:LiLuF₄激光器

Passively Q-switched mode-locked low threshold Tm, Ho: LLF laser with an single walled carbon nanotubes saturable absorber

物理学报. 2018, 67(1): 014201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171748>

基于石墨烯可饱和吸收体的纳秒锁模掺铥光纤激光器

Nanosecond mode-locked Tm-doped fiber laser based on graphene saturable absorber

物理学报. 2017, 66(11): 114209 <https://doi.org/10.7498/aps.66.114209>

石墨烯被动锁模全正色散掺铥光纤激光器中的暗脉冲及其谐波

Dark pulses and harmonic mode locking in graphene-based passively mode-locked Yb³⁺-doped fiber laser with all-normal dispersion cavity

物理学报. 2015, 64(19): 194205 <https://doi.org/10.7498/aps.64.194205>

Nd:LuYAG混晶1123 nm被动调Q激光器

A diode pumped passively Q-switched Nd:LuYAG laser emitting at 1123 nm

物理学报. 2015, 64(17): 174203 <https://doi.org/10.7498/aps.64.174203>

基于氧化石墨烯的瓦级调 Q 锁模 Tm: LuAG 激光器*

孙锐¹⁾²⁾ 陈晨¹⁾²⁾ 令维军^{2)†} 张亚妮^{3)‡} 康翠萍¹⁾ 许强¹⁾

1) (宝鸡文理学院物理与光电技术学院, 宝鸡 721016)

2) (天水师范学院激光技术研究所, 天水 741001)

3) (陕西科技大学文理学院, 西安 710021)

(2018年12月19日收到; 2019年3月15日收到修改稿)

在 Tm: LuAG 全固态激光器中实现了以氧化石墨烯可饱和吸收体为锁模启动元件的瓦级被动调 Q 锁模运转. 本实验装置以可调谐掺钛蓝宝石激光器作为泵浦源, 测得 Tm: LuAG 固态激光器出光阈值最低为 325 mW, 当吸收抽运功率达到 3420 mW 时, 进入稳定的调 Q 锁模运行状态. 当抽运功率达到 8.1 W 时, 对应的最大输出功率为 1740 mW, 中心波长为 2023 nm, 重复频率为 104.2 MHz, 最大单脉冲能量为 16.7 nJ, 调制深度接近 100%.

关键词: Tm: LuAG 激光器, 高功率, 调 Q 锁模, 氧化石墨烯

PACS: 42.55.Rz, 42.60.Fc, 42.60.Gd, 42.70.-a

DOI: 10.7498/aps.68.20182224

1 引言

近年来, 2 μm 超快激光由于其自身广泛的应用前景^[1-4], 受到了越来越多的关注. 为获得 2 μm 超快激光, 可通过在基于掺 Tm³⁺, 掺 Ho³⁺ 或 Tm³⁺ 与 Ho³⁺ 共掺晶体的固体激光器的谐振腔中加入可饱和吸收体进行被动锁模来实现. 然而掺 Tm³⁺ 的锁模固体激光器的功率一般只有几十至几百毫瓦, 鲜有功率达到瓦级的. 目前的报道仅有 2015 年 Feng 等^[5] 使用半导体可饱和吸收镜 (semiconductor saturable absorber mirror, SESAM) 在 Tm: LuAG 激光器中实现了最高 1.21 W 的锁模输出. 但 SESAM 材料的制造工艺相对复杂, 造价十分昂贵, 而且由于其能隙宽度等问题的限制, SESAM 对激光器的

工作波长都有相对苛刻的要求. 因此, 寻找新的可饱和吸收材料来代替 SESAM 是非常有必要的.

近期在 2 μm 波段的超快固体激光器的相关报道中, 证实了以碳纳米管 (carbon nanotubes, CNTs)、过渡金属二卤化物 (transition metal dichalcogenides, TMDs)、石墨烯 (graphene) 等为代表的新型锁模材料可以用作近红外激光锁模启动元件. 而这些材料以其特殊的结构与性能, 也受到了人们越来越多的关注. 其中, 单壁碳纳米管在 2 μm 波段的输出功率一般在 500 mW 以下^[6,7], 过渡金属硫化物在该波段的相关报导也在 30 mW 到 583 mW^[8-10] 范围内. 石墨烯材料因其相对低廉的造价、较宽的吸收光谱、更短的恢复时间以及良好的热传导性等优点, 从 2009 年便开始了用其做可饱和吸收体的研究. 但研究大都集中在 1 μm 波

* 国家自然科学基金 (批准号: 61564008, 11774257, 11647008, 11504416)、陕西省国际科技合作与交流项目 (批准号: 2018KW-016) 和宝鸡市重大科技专项计划项目 (批准号: 2015CXNL-1-3) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wjlingts@sina.com

‡ 通信作者. E-mail: yanizhang1@163.com

段. 2014年, Xu等^[11]在Nd: YVO₄激光器中实现了1.6 W的最大输出. 而有关石墨烯在2 μm波段的报道, 功率大都处于100 mW附近^[12-13], 目前没有瓦级锁模的报道.

过渡金属硫化物具有和石墨烯类似的结构, 属六方晶系, 具有大的比表面积、较好的稳定性以及较大的调制深度. 但热传导率较低, 约为100 W·m⁻¹·K⁻¹, 易产生热损伤, 不利于其在高功率锁模激光器上的应用. 其带隙宽度随层数的减小而增加, 可以利用该特性控制二维过渡金属硫化物(TMDCs)的带隙宽度, 制作各种可饱和吸收体. 目前获得TMDCs最常见的方法是通过机械剥离的方法来制备, 但是这样获得样品的面积普遍很小, 且不易实现大规模生产. 碳纳米管目前最常见的分为单壁碳纳米管和双壁碳纳米管, 这两种材料的性能类似. 该类材料具有制备方法相对简单、成本相对低廉、弛豫时间相对较短等优点. 其中单壁碳纳米管的热传导系数很大, 热导率约为3500 W·m⁻¹·K⁻¹, 很适合应用于高功率锁模激光器, 而且可以通过控制单壁碳纳米管聚合的手性和管径, 制备宽带可饱和吸收体. 虽然该种材料对近红外光有着非常高的吸收率, 但由于其易团聚的特点, 提高了可饱和吸收体的制作难度. 氧化石墨烯性能与石墨烯类似, 具有较高的损伤阈值、较大的调制深度以及较宽的波长吸收范围等优点, 并且原材料价格低廉, 制备方法简单, 目前已实现大批量生产. 其带隙宽度随氧化程度的变化而变化, 可依此制作出各种可饱和吸收体. 由于氧化石墨烯的层状结构上覆盖的大量含氧官能团, 使其表现出强烈的亲水性, 且不易团聚, 对红外波段的光有着很高的吸收率, 因此相较于碳纳米管和过渡金属硫化物更有利于制作成2 μm锁模器件.

氧化石墨烯(graphene oxide, GO)是通过热剥离等方法从氧化石墨中获得的, 由于氧化石墨烯的表面上含有大量含氧官能团, 使其在水溶剂以及其他极性溶剂中能够稳定存在. 相较于石墨烯, 氧化石墨烯能更好地溶于水溶剂^[14]. 氧化石墨烯应用于1 μm锁模器件的报道相对较多. 2011年, Zhang等^[15]在Nd: YVO₄晶体中通过氧化石墨烯可饱和吸收体实现了脉宽11.3 ns, 最高输出功率1.2 W的锁模信号. 2012年, Wang等^[16]在Nd: GdVO₄晶体中通过氧化石墨烯可饱和吸收体实现了最高1.1 W的输出功率, 脉冲宽度4.5 ps. 而2 μm

波段的锁模器件报道很少, 仅Liu等^[17]利用氧化石墨烯在Tm: YAlO₃晶体中实现了268 mW锁模运转.

晶体Lu₃Al₅O₁₂(LuAG)是一种通过提拉法生长的优良增益介质基质材料. 由于LuAG与YAG同构, 因此LuAG和YAG类似, 也拥有较高的导热系数^[18], 与此同时LuAG还拥有较低的声子能量损耗以及较大的吸收和发射截面. 而掺杂有Tm³⁺离子的Tm: LuAG, 具有较高的斜效率和损伤阈值, 且调谐宽度较宽, 其可吸收光谱波长范围较广, 吸收峰主要有682, 788, 1173, 1629 nm^[19]. 2009年, Wu等^[20]在室温条件下实现了Tm: LuAG的连续光运转. 2012年, Chen等^[21]在Tm: LuAG晶体上通过声光开关实现了50 Hz的调Q运转, 脉冲宽度293 ns. 目前, 通过该晶体实现稳定锁模的报道相对较少. 仅2015年Feng等^[5]使用SESAM实现了Tm: LuAG晶体脉冲宽度38 ps的连续锁模运转.

本文通过传统的X型腔, 利用实验室搭建的可调谐钛蓝宝石激光器作为泵浦, 在Tm: LuAG晶体上通过氧化石墨烯实现了稳定的瓦级被动调Q锁模运转, 输出光中心波长2023 nm, 采用3%输出镜时, 最大锁模输出功率1740 mW, 脉冲重复频率104.2 MHz, 对应单脉冲能量为16.7 nJ, 调制深度接近100%.

2 氧化石墨烯可饱和吸收体的制备

本实验通过垂直生长法制备所需的氧化石墨烯可饱和吸收体. 第一步, 在去离子水中按比例加入已制备好的氧化石墨烯粉末, 超声处理10 h后获得均匀混合的氧化石墨烯溶液, 之后将该溶液放入离心机离心处理, 获得混合比例为0.3 mg/mL的氧化石墨烯均匀溶液; 第二步, 将合适尺寸的石英片置于混合比例为3:1的双氧水与浓硫酸均匀混合液中静置, 直至表面无气泡冒出, 取出获得亲水石英片; 第三步, 将制备完成的0.3 mg/mL氧化石墨烯溶液注入到大小合适的聚苯乙烯塑料盒中, 将之前处理好的亲水石英片竖直放入该溶液中静置, 直至氧化石墨烯溶液完全蒸发, 取出静置的石英片. 至此氧化石墨烯可饱和吸收体制备完成.

图1为氧化石墨烯可饱和吸收体拉曼光谱图、电镜图和实物图. 已知E_{2g}¹(平面上)及A_{1g}(平面

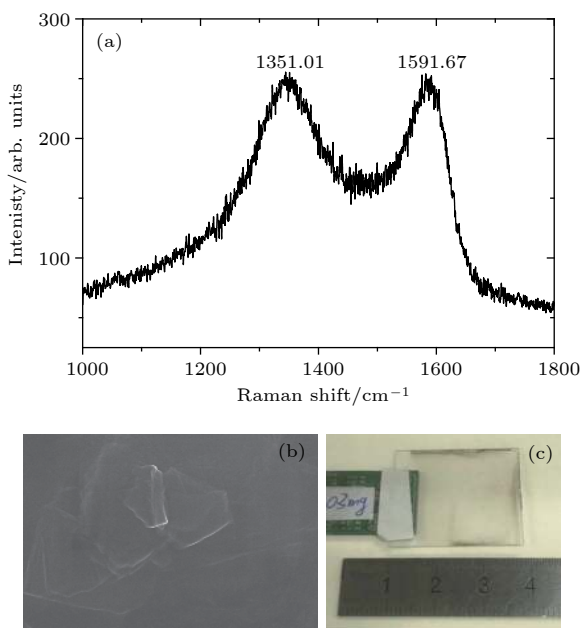


图 1 氧化石墨烯可饱和吸收体 (a) 拉曼光谱图; (b) 扫描电镜图; (c) 实物图

Fig. 1. (a) Raman spectrum of GO-SAs; (b) SEM of GO-SAs; (c) photograph of GO-SAs.

外) 为氧化石墨烯的主要声子振动模, 随着氧化石墨烯厚度的变化, 其主要声子振动模 A_{1g} 模和 E_{2g}^1 模也会分别产生蓝移和红移现象. 由测得的拉曼光谱 (图 1(a)) 可以观察到位于 1351.01 cm^{-1} 和 1591.67 cm^{-1} 处有两个特征峰值, 而这两个特征峰分别对应于 E_{2g}^1 和 A_{1g} 这两个声子振动模, 由此可以估算并确认该氧化石墨烯可饱和吸收体已经剥离出少层结构 [22–24].

3 实验装置

Tm: LuAG 被动锁模激光实验装置如图 2 所示, 这是一个典型的 X 型五镜腔结构. 抽运源为可调谐的掺钛蓝宝石激光器, 采用 Z 型谐振腔, 通过腔内双折射滤光片可将输出波长调谐到 794.2 nm , 正好对应激光晶体的一个吸收峰, 其最高输出功率为 8.1 W . 激光晶体为 Tm: LuAG, 对其两个通光面按布儒斯特角进行切割抛光, 晶体内铥离子 (Tm^{3+}) 掺杂浓度为 5%, 尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$. 为了冷却激光晶体, 控制其运转时因为发热而产生的热透镜效应, 首先将激光晶体使用钢箔进行包裹, 然后将其夹持在专门为其设计的紫铜冷却夹具内, 在实验过程中采用恒温循环水冷却系统对紫铜冷却夹具进行冷却, 恒温水设定维持在 $12 \text{ }^\circ\text{C}$

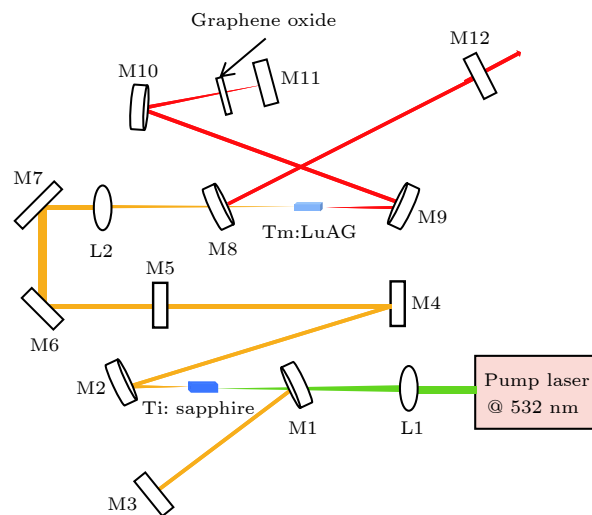


图 2 Tm: LuAG 被动锁模激光实验装置图

Fig. 2. The experimental setup of Tm: LuAG passively Q-switched mode locked laser.

左右. 聚焦透镜 (L2) 焦距 $f = 150 \text{ mm}$, 对抽运光波长高透, 透过率大于 95%. 被动锁模激光实验装置中 M8, M9 分别为曲率半径 100 mm 和 75 mm 的宽带抽运平凹镜, 其对 $770\text{—}1050 \text{ nm}$ 波段的抽运激光透过率大于 95%, 对 $1800\text{—}2075 \text{ nm}$ 波段的振荡光反射率大于 99.9%. M10 为平凹反射镜, 凹面曲率半径为 75 mm , 对 $1800\text{—}2075 \text{ nm}$ 波长反射率大于 99.9%, M11 是对 $1800\text{—}2075 \text{ nm}$ 波段的反射率大于 99.9% 的平面反射镜. M12 为输出耦合镜, 对振荡光 $1800\text{—}2050 \text{ nm}$ 波长的光部分透过, 本实验共选用了透过率为 1.5%, 3% 和 5% 三种规格的输出镜.

利用 $ABCD$ 矩阵模拟激光腔内振荡光斑, 可以计算出晶体中最小光腰半径为 $54.1 \text{ }\mu\text{m}$, 选用焦距 $f = 150 \text{ mm}$ 的聚焦透镜以获得更好的模式匹配, 并很大程度上避免了在高功率条件下晶体的损伤. 由于该氧化石墨烯可饱和吸收体的损伤阈值约 $741.7 \text{ }\mu\text{J}/\text{cm}^2$, 为避免在高功率条件下造成吸收体损坏, M10 选用曲率半径为 100 mm 的平凹反射镜, 氧化石墨烯可饱和吸收体位于 M10 焦点附近, 其表面光束半径经计算约为 $204.1 \text{ }\mu\text{m}$, 启动锁模时, 氧化石墨烯可饱和吸收体上对应功率密度约为 $209 \text{ }\mu\text{J}/\text{cm}^2$.

4 实验结果分析与讨论

采用上述 Tm: LuAG 被动锁模激光实验装置, 获得实验数据如图 3(a) 所示, 激光晶体对泵浦光

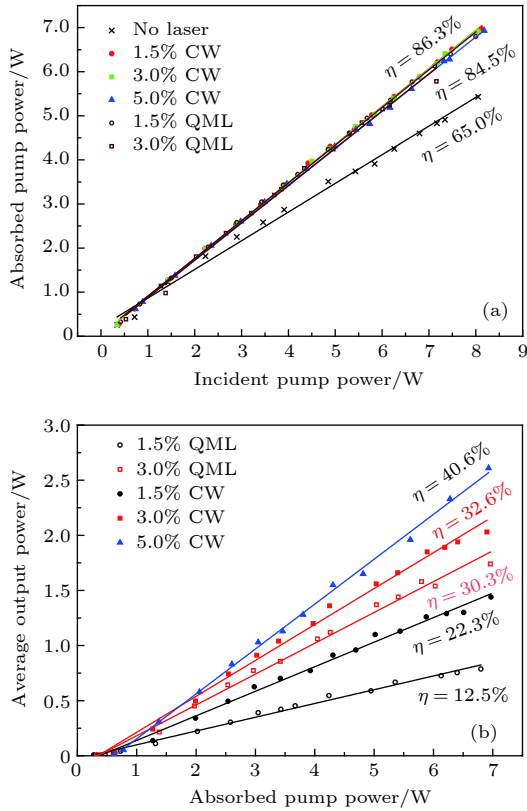


图3 (a) 晶体吸收变化图; (b) 连续光和锁模输出功率随吸收抽运功率的变化
 Fig. 3. (a) The change of crystal absorbed power; (b) Relation between average output power and absorbed pump power under continuous-wave and mode-locked operation.

的吸收率在激光器出光和非出光状态下有很明显的差异。当腔内无激光运转时, 激光晶体对泵浦光的吸收效率仅 65.0%, 当实现连续光运转时, 激光晶体的吸收效率达到了 85% 左右。之后在腔内插入氧化石墨烯时, 选用 1.5% 和 3% 的输出镜, 激光晶体的吸收效率变化不大, 约为 84.5%。

如图 3(b) 所示, 当腔内实现连续光运转时, 选用 1.5%, 3% 和 5% 输出耦合镜时, 出光阈值分别为 276, 326 和 617 mW, 斜效率分别为 22.3%, 32.6% 和 40.6%, 输出最大功率分别为 1440, 2030 和 2610 mW。当腔内插入氧化石墨烯时, 首先选用 1.5% 的输出镜, 此时出光阈值为 325 mW, 激光器最大输出功率为 787 mW, 斜效率为 12.5%; 选择 3% 的输出耦合镜时, 出光阈值为 351 mW, 激光器最大输出功率为 1740 mW, 斜效率为 30.3%; 采用 5% 的输出镜, 由于腔内损耗过大, 无法实现稳定的调 Q 锁模运转。由实验数据可知, 调 Q 锁模运转时在 3% 输出镜条件下出光阈值仅与 1.5% 输出镜相差 26 mW, 但输出功率高出

2.2 倍, 所以我们在调 Q 锁模运转时主要使用透过率为 3% 的输出耦合镜。图 3 中对应的功率曲线并没有达到饱和, 相信后期通过进一步优化模式匹配, 提升泵浦功率以及控制腔内色散, 将有望实现连续锁模。

本实验通过光谱分析仪 (AvaSpecNIR256-2.5TEC) 测量获得锁模脉冲光谱, 如图 4 所示, 输出脉冲信号的中心波长位于 2023 nm, 脉冲信号光谱半高宽 $\Delta\lambda$ 为 12 nm。图 5 为通过光电二极管探测器 (ET-5000) 测得的调 Q 锁模脉冲序列, 扫描时间分别为 1 ms, 100 μ s, 2 μ s 和 10 ns。测得调 Q 包络的宽度为 5 μ s, 重复频率为 83.33 kHz, 调 Q 包络下锁模脉冲的频率为 104.2 MHz, 符合锁模脉冲的重复频率理论公式 $f = C / (2L)$, 其中 C 为光速, L 为振荡腔长, 而且通过脉冲序列图可看出锁模脉冲的调制深度接近 100%。

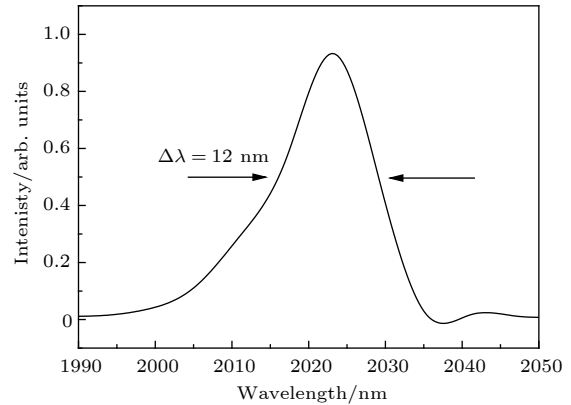


图4 锁模脉冲信号的输出光谱
 Fig. 4. The output spectrum of the mode locking signal pulse.

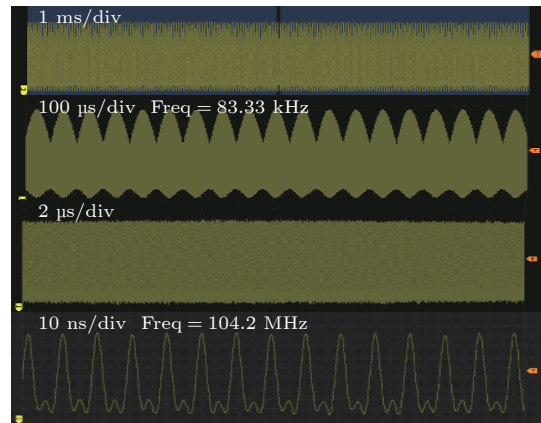


图5 扫描时间为 1 ms, 100 μ s, 2 μ s 和 10 ns 的锁模脉冲序列
 Fig. 5. Mode-locked pulse trains recorded in 1 ms, 100 μ s, 2 μ s and 10 ns per division (div) timescales.

由于实际的脉冲宽度比实验中采用的自相关仪 (APE, pulse check 150) 可测量的脉冲宽度上限 150 ps 要宽, 所以没能测量到准确的脉冲自相关信号. 可根据示波器的锁模脉冲信号, 通过以下公式估算出实际的锁模脉冲宽度:

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

式中, t_m 为测得的脉冲上升沿时间, t_r 为实际的脉冲上升沿时间, t_p 为二极管探测器的上升沿时间, t_0 为示波器的上升沿时间^[25]. 而示波器的上升沿时间可以利用公式计算得到:

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

其中, W_B 为示波器的带宽, 本实验中的数字示波器 (RIGOL, DS4024) 的带宽为 200 MHz, 因此可估算得到 $t_0 = 1750$ ps, 又已知实验测得的脉冲上升沿时间约为 1900 ps, 而 2 μm 光电二极管探测器 (ET-5000) 的上升沿时间为 35 ps, 因此可推算得到实际的锁模脉冲上升沿时间约为 739.1 ps, 而脉冲宽度约等于上升沿时间的 1.25 倍, 因此实际锁模脉冲宽度约为 923.8 ps. 通常情况下激光腔的群色散延迟 (group delay dispersion, GDD) 主要由增益介质产生, 主要由增益介质的自相位调制 (self-phase modulation, SPM) 产生正色散, 自相位调制产生的色散与腔内功率正相关, 其数值一般可高达 1000 fs² 以上. 为了避免色散展宽, 可以用符号相反的 GDD 来补偿, 后期通过在腔内引入比如 CaF₂ 棱镜对、啁啾镜以及 gires-tournois-interferometer (GTI) 等, 有望获得更窄的脉宽.

5 结 论

采用氧化石墨烯可饱和吸收体, 首次在 Tm:LuAG 全固态激光器中实现了瓦级被动调 Q 锁模运转. 该谐振腔在 5% 输出镜的连续光运转下最大输出功率达到了 2610 mW. 在该谐振腔内加入氧化石墨烯可饱和吸收体后, 在 3% 输出耦合镜条件下, 出光阈值最低为 351 mW, 当吸收抽运功率达到 3420 mW 时, 进入稳定的调 Q 锁模运行状态. 当抽运功率达到 8.1 W 时, 中心波长为 2023 nm, 对应的最大输出功率为 1740 mW, 重复频率为 104.2 MHz, 最大单脉冲能量为 16.7 nJ, 锁模状态下输出光 4 h 功率稳定度 2.2%. 实验结果表明, 氧化石墨烯可以作为 2 μm 波段瓦级固体激光器被动

调 Q 的可饱和吸收体材料. 后期通过提高腔内功率密度, 进一步降低氧化石墨烯可饱和吸收体的损耗, 控制腔内色散将有可能实现连续锁模.

参考文献

- [1] Kaufmann R, Hibst R 1996 *Lasers Surg. Med.* **19** 324
- [2] Sorokin E, Sorokina I T, Mandon J, Guelachvili G, Picqué N 2007 *Opt. Express* **15** 16540
- [3] Li J, Luo H, Wang L, Liu Y, Yan Z, Zhou K, Zhang L, Turistsyn S K 2015 *Sci. Rep.* **5** 10770
- [4] Yao B Q, Shen Y J, Duan X M, Dai T Y, Ju Y L, Wang Y Z 2014 *Opt. Lett.* **39** 6589
- [5] Feng T, Yang K, Zhao J, Zhao S, Qiao W, Li T, Dekorsy T, He J, Zheng L, Wang Q 2015 *Opt. Express* **23** 11819
- [6] Ling W J, Xia T, Dong Z, Zuo Y Y, Li K, Liu Q, Lu F P, Zhao X L, Wang Y G 2008 *Acta Phys. Sin.* **67** 014201 (in Chinese) [令维军, 夏涛, 董忠, 左银艳, 李可, 刘勍, 路飞平, 赵小龙, 王勇刚 2008 物理学报 **67** 014201]
- [7] Cho W B, Schmidt A, Yim J H, Choi S Y, Lee S, Rotermund F, Griebner U, Steinmeyer G, Petrov V, Mateos X, Pujol M C, Carvajal J J, Aguiló M, Díaz F 2009 *Opt. Express* **17** 11007
- [8] Zou X, Leng Y, Li Y, Feng Y, Zhang P, Hang Y, Wang J 2015 *Chin. Opt. Lett.* **13** 081405
- [9] Kong L C, Xie G Q, Yuan P, Qian L J, Wang S X, Yu H H, Zhang H J 2015 *Photon. Res.* **3** A47
- [10] Li L, Jiang S, Wang Y, Wang X, Duan L, Mao D, Li Z, Man B, Si J 2015 *Opt. Express* **23** 28698
- [11] Xu S C, Man B Y, Jiang S Z, Chen C S, Yang C, Liu M, Huang Q J, Zhang C, Bi D, Meng X, Liu F Y 2014 *Opt. Laser Technol.* **56** 393
- [12] Ma J, Xie G Q, Lü P, Gao W L, Yuan P, Qian L J, Yu H H, Zhang H J, Wang J Y, Tang D Y 2012 *Opt. Lett.* **37** 2085
- [13] Ma J, Xie G, Zhang J, Yuan P, Tang D, Qian L 2015 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **21** 50
- [14] Zhu Y, Murali S, Cai W, Li X, Ji W S, Potts J R, Ruoff R S 2010 *Adv. Mater. (Weinheim, Ger.)* **22** 3906
- [15] Zhang L, Wang Y G, Yu H J, Zhang S B, Hou W, Lin X C, Li J M 2011 *Laser Phys.* **21** 2072
- [16] Wang Y, Qu Z, Liu J, Tsang Y H 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 3259
- [17] Liu J, Wang Y G, Qu Z S, Zheng L H, Su L B, Xu J 2012 *Laser Phys. Lett.* **9** 15
- [18] Wu C, Ju Y, Li Y, Wang Z, Wang Y 2008 *Chin. Opt. Lett.* **6** 415
- [19] Zhou D 2007 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Shanghai University) (in Chinese) [周鼎 2017 博士学位论文 (上海: 上海大学)]
- [20] Wu C T, Ju Y L, Wang Q, Wang Z G, Chen F, Zhou R L, Wang Y Z 2009 *Laser Phys. Lett.* **6** 707
- [21] Chen F, Wu C T, Ju Y L, Yao B Q, Wang Y Z 2012 *Laser Phys.* **22** 371
- [22] Zeng H, Liu G B, Dai J, Yan Y, Zhu B, He R, Xie L, Xu S, Chen X, Yao W, Cui X 2013 *Sci. Rep.* **3** 1608
- [23] Mak K F, Lee C, Hone J, Shan J, Heinz T F 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 136805
- [24] Splendiani A, Sun L, Zhang Y, Li T, Kim J, Chim C Y, Galli G, Wang F 2010 *Nano Lett.* **10** 1271
- [25] Li Z Y, Zhang B T, Yang J F, He J L, Huang H T, Zuo C H, Xu J L, Yang X Q, Zhao S 2010 *Laser Phys.* **20** 761

Watt-level passively Q-switched mode-locked Tm: LuAG laser with graphene oxide saturable absorber*

Sun Rui¹⁾²⁾ Chen Chen¹⁾²⁾ Ling Wei-Jun^{2)†} Zhang Ya-Ni^{3)‡}
 Kang Cui-Ping¹⁾ Xu Qiang¹⁾

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) (*School of Arts and Sciences, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China*)

(Received 19 December 2018; revised manuscript received 15 March 2019)

Abstract

A watt-level passive Q-switched mode-locked operation in Tm: LuAG all-solid-state laser is realized for the first time by using graphene oxide (GO) saturable absorber as a mode-locked starting element. The laser is pumped by a wavelength tunable Ti: sapphire laser operating at 794.2 nm. In this experiment, the maximum continuous-wave (CW) output power of 1440 mW, 2030 mW and 2610 mW are obtained by 1.5%, 3% and 5% output coupled (OC) mirrors respectively, in which the corresponding slope efficiencies are 22.3%, 32.6% and 40.6%, respectively. When the GO is inserted into the cavity, the laser bump threshold is further increased due to more intracavity loss. With a 1.5% OC mirror, the absorbed pump threshold is as low as 325 mW, the maximum output power is 787 mW, and the corresponding slope efficiency is 12.5%. With a 3% OC mirror, the absorbed bump threshold is 351 mW, the maximum output power is 1740 mW, and corresponding slope efficiency is 30.3%. With a 5% OC mirror, the QML operation is not realized due to the increase of intracavity loss. Although the laser pump threshold power of 3% OC mirror differs from that of 1.5% OC mirror by 26 mW, the output power is more than twice higher than that of 1.5% OC mirror. For these reasons, we use a 3% OC mirror in our experiment. In this case, a stable QML operation with a threshold of 3420 mW is obtained. When the pump power reaches 8.1 W, the corresponding maximum output power is 1740 mW, the central wavelength is 2023 nm, the repetition frequency is 104.2 MHz, the maximum single pulse energy is 16.7 nJ, and the modulation depth is close to 100%. According to the symmetrical shape of the mode locked pulse and considering the definition of rise time, we can assume that the duration of the pulse is approximately 1.25 times the pulse rise time. So the width of the mode locked pulse is estimated at about 923.8 ps. The results show that the GO is a promising high power saturable absorber in 2 μm wavelength for the QML solid-state laser. In the next stage, we will increase the pump power, optimize the quality of the GO material, and compensate for the dispersion in the cavity. It is expected to achieve a CW mode-locked operation and femtosecond pulse output.

Keywords: high power, Tm: LuAG laser, Q-switched mode-locking, graphene oxide

PACS: 42.55.Rz, 42.60.Fc, 42.60.Gd, 42.70.-a

DOI: 10.7498/aps.68.20182224

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61564008, 11774257, 11647008, 11504416), the International Science & Technology Cooperation and Exchanges Project of Shaanxi, China (Grant No. 2018KW-016), the Key Sciences and Technology Project of Baoji City, China (Grant No. 2015CXNL-1-3), and the Key Research Project of Shaanxi University of Science & Technology, China (Grant No. 2018WLXY-01-01).

† Corresponding author. E-mail: wjlings@sina.com

‡ Corresponding author. E-mail: yanizhang1@163.com