

doi:10.3788/gzxb20134208.0978

基于石墨烯的 $2\ \mu\text{m}$ 掺铥光纤被动调 Q 激光器

李雕¹, 江曼¹, 祁媚¹, 郑新亮¹, 任兆玉¹, 孙志培² 王屹山³, 白晋涛¹

(1 西北大学 光子学与光子技术研究所; 陕西省光电技术与功能材料省部共建国家重点实验室培育基地;
国家级光电技术与功能材料及应用国际科技合作基地, 西安 710069)

(2 剑桥大学 工程学院, 英国 剑桥 CB3 0FA)

(3 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

摘要:报道了石墨烯可饱和吸收体作用于 $2\ \mu\text{m}$ 激光的被动调 Q 脉冲输出特性. 采用线型谐振腔, 掺铥光纤和石墨烯可饱和吸收镜分别作为增益介质和被动调 Q 器件, 792 nm 半导体激光器端面泵浦掺铥光纤, 利用一组准直聚焦透镜将腔内光束会聚到石墨烯所在位置, 成功实现了中心波长为 1 958 nm 的被动调 Q 脉冲输出. 当泵浦功率为 3.0 W 时, 获得了 1.02 μs 的最窄脉冲宽度, 对应的平均输出功率为 26 mW, 脉冲重复频率为 116 kHz, 单脉冲能量为 224 nJ, 平均输出功率、脉冲宽度与泵浦功率近似呈线性关系. 实验结果表明, 石墨烯优良的可饱和吸收特性, 可有效实现 $2\ \mu\text{m}$ 波段的被动调 Q 激光运转.

关键词: 石墨烯; 被动调 Q; 掺铥光纤; 可饱和吸收体; 短脉冲

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)08-0978-5

Graphene-based $2\ \mu\text{m}$ Tm^{3+} -doped Fiber Passively Q-switched Laser

LI Diao¹, JIANG Man¹, QI Mei¹, ZHENG Xin-liang¹, REN Zhao-yu¹,
SUN Zhi-pei², WANG Yi-shan³, BAI Jin-tao¹

(1 *Institute of Photonics & Photon-Technology, Department of Physics; The Cultivation Base of The State Key Lab of Optoelectronic Technology and Functional Materials Co-constructed by Ministry of Education and Shaanxi Province; National-level Optical Technology and Functional Materials and The Application of International Scientific and Technological Cooperation Based, Northwest University, Xi'an 710069, China*)

(2 *Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge CB30FA, UK*)

(3 *State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

Abstract: The output characteristics of graphene-based passively Q-switched pulses at $2\ \mu\text{m}$ wavelengths were reported. On the basis of linear resonant cavity, Tm^{3+} -doped fiber and graphene saturable absorber mirror served as gain medium and passively Q-switched device respectively. Tm^{3+} -doped fiber was end pumped by 792 nm semiconductor laser. Light in the cavity was focused onto graphene membrane through a set of collimation and focusing lens. Passively Q-switched pulses centered at 1 958 nm wavelength were acquired successfully. The minimum pulse width of 1.02 μs was obtained when pump power rise to 3.0 W, and corresponding average output power of 26 mW, repetition rate of 116 kHz, single pulse energy of 224 nJ were obtained respectively. Furthermore, average output power and pulse width presented

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61177059, 61275105)、陕西省自然科学基金(No. 2012JM1019)和陕西省光电子技术重点实验室(No. 11JS106)资助

第一作者: 李雕(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为石墨烯、碳纳米管可饱和吸收体的制备及调 Q. Email: gvrewq@163.com

导师(通讯作者): 白晋涛(1959-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为新型激光技术与器件、非线性光学、纳米功能材料等. Email: baijt@nwu.edu.cn

收稿日期: 2013-01-15; 录用日期: 2013-03-08

approximate linear relationship with incident pump power. The experimental results indicate that excellent saturated absorption characteristic of graphene is effective for passively Q-switched pulse operation at 2 μm wavelengths.

Key words: Graphene; Passively Q-switched; Tm doped fiber; Saturable absorber; Short pulses

0 引言

2 μm 波段脉冲激光器在医学、光通讯、超快光学、遥感技术和雷达等领域具有广阔的应用前景^[1]. 目前,被动调 Q 技术是产生短脉冲激光的简便方法,Cr⁴⁺:YAG 和 GaAs 可饱和吸收体是颇受青睐的被动调 Q 器件,但其成本较高、饱和吸收带宽有限,难以覆盖 2 μm 光谱区,这些因素阻碍了 2 μm 被动调 Q 激光器的发展^[2-4]. 近年来,随着新型功能材料石墨烯的出现,其超宽的可饱和吸收带(从可见到中红外)、可控的调制深度、低的饱和强度、高的损伤阈值^[5]、以及容易制备、成本低廉等优点^[6],迅速引起了人们的广泛关注和深入研究. 采用石墨烯作为可饱和吸收体在 1.5 μm 通信波段、1 μm 近红外波段产生调 Q 脉冲激光已经有许多报道^[7-11],但在 2 μm 波段相关报道还比较少. 2011 年,刘江等利用在环形腔掺铥光纤激光器中插入石墨烯的方法,首次在国内实现了 2 μm 波段的石墨烯被动调 Q 脉冲,输出中心波长为 2 007 nm,最窄脉冲宽度为 1.4 μs ,但最大平均输出功率仅有 5 mW^[12]. 2012 年,G. Q. Xie 等通过腔内插入石墨烯的方法,在 Tm:CLNGG 激光器中实现了中心波长为 2 013.5 nm,最大平均功率为 40 mW,最窄脉宽为 9 μs 的调 Q 脉冲输出^[13]. 以上报道表明石墨烯用于近红外光谱区被动调 Q 具有巨大优势和潜力,但是在 2 μm 波段,还需要更深入的研究,以提高激光脉冲的参量指标.

本文以线型谐振腔为基础,采用 792 nm 半导体激光器端面泵浦,掺铥光纤作为增益介质,石墨烯可饱和吸收体作为被动调 Q 器件;通过改进和优化谐振腔参量,在激光器稳定的被动调 Q 运转状态,在 1 958 nm 中心波长处,获得了最大平均功率 26 mW、最短脉冲宽度 1.02 μs 的脉冲输出,对应的脉冲重复频率为 116 kHz,单脉冲能量为 224 nJ.

1 实验方案

1.1 制备石墨烯可饱和吸收镜

实验使用的被动调 Q 器件是将石墨烯吸附在平面镜上构成的,即石墨烯可饱和吸收镜. 整个器件制备的关键是石墨烯的生长,主要采用工艺成熟的化学气相沉积法 (Chemical Vapor Deposition, CVD). 该方法是以具有较低溶碳量的铜箔作为衬

底和催化剂,C₂H₂ 气体为石墨烯提供碳原子,H₂ 为载气,再通入 Ar 作为辅助气体,在高温和铜催化条件下,C₂H₂ 裂解生成的碳原子沉积在铜箔表面,随着反应的持续进行,碳原子逐渐铺满整个铜箔,形成完整的薄膜.

生长在铜箔上的石墨烯薄膜可以转移到所需的基底上. 实验中,将其转移到镀有 2 μm 高反射膜的平面镜上,具体过程为:将表面长有石墨烯的铜箔浸入预先配置的 Fe(NO₃)₃ 溶液中,铜会与 Fe(NO₃)₃ 发生化学反应生成可溶性的 Cu(NO₃)₂,化学性质稳定的石墨烯薄膜悬浮于溶液中;再用去离子水清洗薄膜表面的残留溶液,然后将其转移到平面镜上,制成石墨烯可饱和吸收镜,最后置于 40 $^{\circ}\text{C}$ 的干燥箱中烘干.

石墨烯的生长对环境和工艺要求很高,即使微小的条件变化也会对它的缺陷、层数等参量造成影响. 层数越多的石墨烯产生的非饱和和损失越大,调制深度也越低^[14],调制深度的变化会影响调 Q 脉冲的稳定性. 所以,对石墨烯进行表征,掌握它的参量变化十分重要. 图 1 是对样品进行 514 nm 喇曼光谱分析得到的结果,其中三个明显的特征峰 D、G 和 2D 峰分别位于 1 385 cm^{-1} 、1 580 cm^{-1} 和 2 722 cm^{-1} 处.

G 峰是碳原子 sp² 结构的特征峰,反映其对称性和结晶程度,2D 峰则源于双声子的非弹性散射^[15-16]. 从 G 峰和 2D 峰的相对强度和宽度来分析,该样品由多层石墨烯构成. 位于 1 385 cm^{-1} 处的 D 峰表示样品的缺陷密度^[17],主要反映石墨烯样品的无序性,图 1 中 D 峰的强度相对较小,表明样品中存在的缺陷较少.

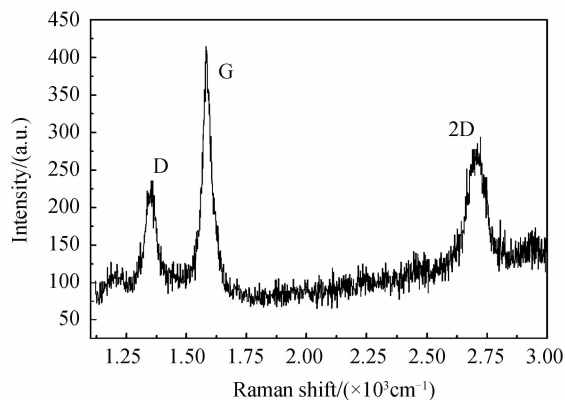


图 1 石墨烯的喇曼光谱
Fig. 1 Raman shift of graphene

1.2 激光器结构设计

激光器实验装置如图2,泵浦源采用792 nm的半导体激光器,泵浦光为单模光纤输出,输出光经过准直聚焦注入到增益光纤纤芯端面.增益介质采用长度为1 m的掺铥光纤,铥离子掺杂浓度为5 at.%,纤芯直径6 μm ,数值孔径0.23,包层直径125 μm ,数值孔径0.45.掺铥光纤接收泵浦光的端面零度切割,引入了菲涅耳反射,对于腔内振荡光来说相当于部分反射镜,光纤另一端位于腔内,采用8°切割,以消除零度切割存在的菲涅耳反射效应对振荡光造成的反馈.在右端垂直于增益光纤方向放置石墨烯可饱和吸收镜,同时作为被动调Q器件和端面全反镜.平面二色镜 M_2 与增益光纤方向呈45°角,表面镀2 μm 高反射膜和792 nm减反射膜,右端的两个透镜 L_3 、 L_4 与 M_2 组成准直聚焦和泵浦光过滤系统,防止残余的泵浦光反馈回腔内, L_3 、 L_4 透镜焦距分别为8 mm、200 mm,通过调节这两个透镜的位置可以改变会聚在石墨烯处的光斑大小;在调Q脉冲输出端与泵浦光耦合透镜 L_2 之间插入45°放置的二色镜 M_1 ,表面镀2 μm 高反射膜和792 nm减反射膜,可以防止从光纤端面输出的调Q脉冲反向传输到泵浦源中对其造成不利影响,同时,也将调Q脉冲以垂直于光轴的方向耦合输出,输出光路上的透镜 L_5 起准直作用.

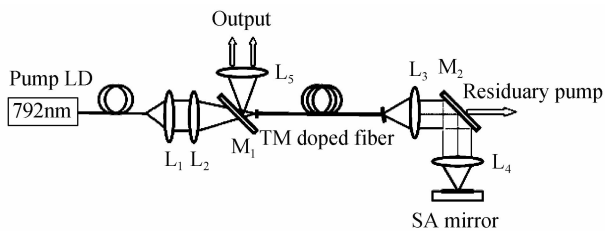


图2 被动调Q激光器实验装置

Fig. 2 Experimental setup of the passively Q-switched laser

2 实验结果与讨论

2.1 激光器的输出功率与输入泵浦功率的关系

在激光器稳定运转状态下,测量不同泵浦功率对应的输出功率,如图3.当泵浦功率为2.4 W时,激光器进入阈值调Q运转,脉冲平均输出功率约为2 mW,随着泵浦功率的增加,输出功率近似呈线性增大,当泵浦功率增加到3.0 W时,平均输出功率达到最大的26 mW;继续增加泵浦功率至3.05 W以上时,脉冲序列开始出现抖动,调Q进入非稳状态.图4为采用分辨率为0.1 nm的光栅光谱仪(omni- λ 7515 Monochromator/spectrograph, Zolix)在激光器被动调Q运转时测量的光谱分布,谱线中心波长为1 958 nm,半峰宽度为2.5 nm.

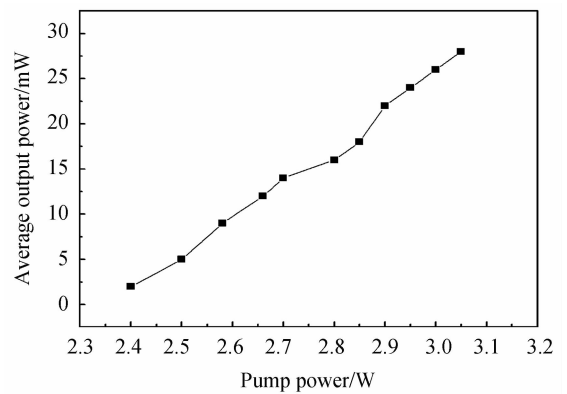


图3 调Q激光器平均输出功率随输入泵浦功率的变化
Fig. 3 Average output power versus incident pump power for Q-switched laser

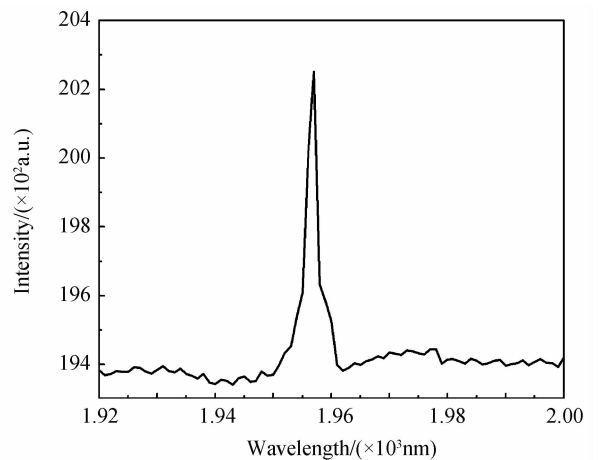


图4 调Q输出激光光谱分布

Fig. 4 The spectrum of output pulse for Q-switched laser

2.2 泵浦功率对脉冲重复频率和脉冲宽度的影响

由于脉冲产生机制的不同,影响调Q脉冲重复频率的因素不像锁模脉冲那样单一的依赖于腔长,而是主要由泵浦功率决定^[18].图5为输出脉冲的重复频率和脉冲宽度随泵浦功率的变化曲线.当泵浦功率从2.4 W逐渐增加到2.66 W,脉冲重复频率

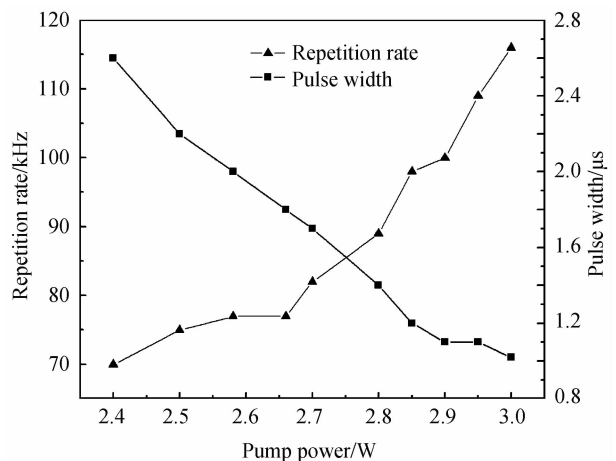


图5 重复频率和脉冲宽度随泵浦功率的变化
Fig. 5 Repetition rate and pulse width versus incident pump power

也随之增大,但增大的速率比较缓慢;继续增加泵浦功率,重复频率逐渐表现出近似的线性变化.脉冲重复频率的这一变化特点与石墨烯可饱和吸收体的漂白时间和铈离子上能级反转粒子数密度有关,当泵浦功率增加时,激光上能级反转粒子数密度增加,腔内的净增益系数变大,石墨烯的漂白时间缩短,脉冲重复频率增加.

调 Q 脉冲宽度与泵浦功率总体上也呈线性关系,随着泵浦功率的增加脉冲宽度越来越窄.主要原因是泵浦功率的增加导致低 Q 值状态下增益介质上能级储存的反转粒子数增加,当石墨烯吸收饱和(即谐振腔处于高 Q 值状态)时,腔内光子数在较短的时间内迅速增加,释放出更短的脉冲.当增加泵浦功率至 3.0 W 时,获得了 26 mW 的最大平均输出功率和 1.02 μs 的最窄脉冲宽度,脉冲重复频率和单脉冲能量也分别达到 116 kHz 和 224 nJ.

2.3 调 Q 光脉冲信号的测量

当泵浦功率为 3.0 W 时,采用带宽为 12 MHz 的光电探测器 (DET10D Operation Manual-long Wavelength InGaAs Detector, Thorlabs) 对输出脉冲序列进行测量,将光脉冲信号转换为电信号输入到带宽为 1 GHz 的数字示波器 (Infiniium DS09104A Digital storage Oscilloscope, Agilent Technologies) 中,直接观察到了稳定的调 Q 脉冲序列,如图 6. 图 6(a) 为将脉冲序列中的尖峰展开后的单脉冲波形,图 6(b) 为更宽时间域内的多个脉冲序列,相邻的两个脉冲时间间隔约为 8.6 μs ,与重复频率的值相一致,从图中可以看出,脉冲序列和单脉冲平滑稳定.

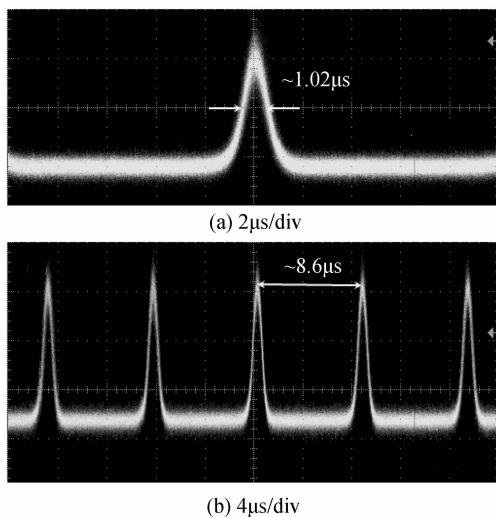


图 6 不同时间域的调 Q 脉冲

Fig. 6 The Q-switched pulses in different time scales

3 结论

本文以石墨烯可饱和吸收镜作为被动调 Q 器件,采用 792 nm 半导体激光器端面泵浦掺铈光纤增益介质,准直聚焦透镜将振荡光会聚到石墨烯所处位置,在掺铈光纤激光器中成功实现了中心波长在 1 958 nm 的被动调 Q 脉冲输出,输出谱线宽度为 2.5 nm. 实验中,当泵浦功率从 2.4 W 增加到 3.0 W 时,激光器一直处于稳定的被动调 Q 状态,平均输出功率、脉冲宽度和脉冲重复率频率分别在 2~26 mW、2.6~1.02 μs 和 70~116 kHz 之间变化. 1.02 μs 的脉冲宽度是国内目前在该领域实现的最小值. 但是,激光器平均输出功率仍然较低,调 Q 阈值较高,这与本文采用的输出耦合方式和石墨烯的质量有关,在后续工作中,可以通过改变激光器的输出耦合方式和输出透射比来提高调 Q 脉冲平均输出功率;同时,改进石墨烯的生长工艺,获得调制深度可控的石墨烯,也可有效改善激光器的输出指标.

参考文献

- [1] LI Da-jun, DU Ge-guo. The recent research progress of Tm³⁺-doped fiber lasers[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(5): 540-543.
黎大军,杜戈果. 掺铈光纤激光器研究进展[J]. *激光技术*, 2007, **31**(5): 540-543.
- [2] JIANG Xin-ying, ZHENG Jiang-gang, YU Hai-wu, et al. Theoretical and experimental research on output characteristics of Cr³⁺ : YAG passively Q-switched laser[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2011, **23**(3): 586-588.
蒋新颖,郑建刚,於海武,等. Cr³⁺ : YAG 被动调 Q 激光器输出特性[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(3): 586-588.
- [3] TSUNEKANE M, TAIRA T. Laser performance of composite Nd : YAG/Cr : YAG Ceramics for laser ignition [J]. *CLEO*, 2011, **8**(6): 641-642.
- [4] LI Gui-qiu, ZHAO Sheng-zhi, YANG Hong-zhi, et al. Diode-pumped doubly passively Q-switched Cr, Nd : YAG/KTP green laser with GaAs saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(11): 4713-4720.
- [5] XING Gui-chuan, GUO Hong-chen, ZHANG Xin-hai, et al. The physics of ultrafast saturable absorption in graphene[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(5): 4564-4573.
- [6] POPA D, SUN Z, FERRARI A C, et al. Sub 200 fs pulse generation from a graphene mode-locked fiber laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(20): 203106.
- [7] ZHOU Da-peng, WEI Li, LIU Wing-ki. Tunable graphene Q-switched erbium-doped fiber laser with suppressed self-mode locking effect[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(14): 2554-2558.
- [8] LIU J, WU S, WANG P, et al. Stable nanosecond pulse generation from a graphene-based Q-switched Yb-doped fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(20): 4008-4010.
- [9] LUO Zheng-qiang, ZHOU Min, CAI Zhi-ping, et al. Graphene-based passively Q-switched dual-wavelength erbium-doped fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(21): 3709-3711.

- [10] JIANG Man, REN Zhao-yu, BAI Jin-tao, *et al.* Graphene-based passively Q-switched diode-side-pumped Nd : YAG solid laser[J]. *Optics Communications*, 2011, **28**(22): 5353-5356.
- [11] CAO Yi, LIU Jia, WANG Pu, *et al.* Passively Q-switched Nd : YAG microchip laser based on graphene[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(2): 0202009.
曹懿, 刘佳, 王璞, 等. 基于石墨烯被动调 Q Nd : YAG 晶体微片激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0202009.
- [12] LIU Jiang, WANG Pu. 2.0 μm graphene passively Q-switched Tm³⁺-doped all fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(10): 1008004.
刘江, 王璞. 2.0 μm 石墨烯被动调 Q 掺铥全光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1008004.
- [13] XIE G Q, MA J, TANG D Y, *et al.* Graphene saturable absorber for Q-switching and mode locking at 2 μm wavelength[J]. *Optical Materials Express*, 2012, **2**(6): 878-883.
- [14] LI Xian-lei, XU Jin-long, HAO Xiao-peng, *et al.* Large energy laser pulses with high repetition rate by graphene Q-switched solid-state laser [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(10): 9950-9955.
- [15] FERRARI A C, NOVOSELOV K S, GEIM A K, *et al.* Raman spectrum of graphene and graphene layers [J]. *Physical Review Letters*, 2006, **97**(18): 187401.
- [16] FERRARI A C, ROBERTSON J. Interpretation of raman spectra of disordered and amorphous carbon[J]. *Physical Review B*, 2000, **61**(20): 14095-14107.
- [17] LI Xue-song, CAI Wei-wei, Rodney S Ruoff, *et al.* Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils[J]. *Science*, 2009, **324**(3): 1312-1314.
- [18] POPA D, SUN Z, FERRARI A C, *et al.* Graphene Q-switched, tunable fiber laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **98**(7): 073106 1-073106 3.