

# 基于拉锥光纤石墨烯可饱和吸收体的被动调 Q 锁模掺铥光纤激光器

杨 光 楼嘉昌 韩达明 王振洪 王 志 刘艳格

(南开大学现代光学研究所, 光学信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

**摘要** 报道了以拉锥光纤上的石墨烯作为可饱和吸收体的  $2\ \mu\text{m}$  被动调 Q 锁模掺铥光纤激光器, 采用环形腔结构, 研究了腔内脉冲随着抽运功率增加的演化过程, 并最终得到了稳定的调 Q 锁模脉冲, 当抽运功率达到 390 mW 时, 开始出现调 Q 状态, 重复频率为 19.5 kHz。当抽运功率达到 490 mW 时开始出现调 Q 锁模现象。调 Q 包络重复频率为 30.2 kHz, 锁模脉冲重复频率为 19.5 MHz。当抽运功率达到 610 mW 时, 锁模脉冲会填满调 Q 包络, 此时调 Q 包络重复频率为 44.9 kHz, 锁模脉冲重复频率仍为 19.5 MHz。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 掺铥光纤; 石墨烯; 调 Q 锁模

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.s102014

## Passively Q-switched Mode-Locked Thulium-Doped Fiber Laser by Using Graphene Saturable Absorber on Tapered Fiber

Yang Guang Lou Jiachang Han Daming Wang Zhenhong Wang Zhi Liu Yange

(Key Laboratory of Optical Information and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin, 300071, China)

**Abstract** A passively  $2\ \mu\text{m}$  Q-switched mode-locked thulium-doped fiber laser by using graphene saturable absorber on tapered fiber is experimentally demonstrated. The pulse evolution with the increase of the pump power is discussed in the experiment. Finally stable Q-switched mode-locked pulse is obtained. Stable Q-switched pulse trains occur at 390 mW pump power and the repetition rate is 19.5 kHz. When the pump power increases to 490 mW, Q-switched mode-locked pulse can be obtained. The Q-switched frequency is recorded with a frequency of 30.2 kHz and the mode-locked frequency is 19.5 MHz. After increasing the pump power to 610 mW, the mode-locked pulses are filled up with the Q-switched envelope. The Q-switched frequency is 44.9 kHz and mode-locked frequency is still 19.5 MHz.

**Key words** lasers; fiber lasers; thulium-doped fiber; graphene; Q-switched mode-locked

**OCIS codes** 140.3510; 140.3280; 140.307

## 1 引 言

由于光纤激光器具有结构紧凑、体积小、能量转化效率高、输出光束质量好等特点。因此近年来, 光纤激光器受到人们广泛的关注。相比于传统的掺铟光纤激光器和掺镱光纤激光器, 掺铥光纤(TDF)激光器工作在  $1.85\sim 2\ \mu\text{m}$  波段, 该波段内的激光对人眼是安全的, 在空间光通信、激光雷达、激光手术、激光材料加工等领域有重要应用, 同时还可以作为抽运源去抽运其他工作物质, 获得  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  的激光输出。与连续型掺铥光纤激光器相比, 锁模掺铥光纤激光器具有更高的峰值功率, 更有利于掺铥光纤激光器在上述领域中的应

收稿日期: 2015-03-25; 收到修改稿日期: 2015-05-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11174154)、国家级大学生创新创业训练计划(201310055044)

作者简介: 杨 光(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事掺铥光纤激光器方面的研究。

E-mail: 2120120211yg@mail.nankai.edu.cn

导师简介: 刘艳格(1973—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤光子学和现代光纤通信传感技术方面的研究。

E-mail: ygliu@nankai.edu.cn(通信联系人)

用,因此锁模掺铥光纤激光器已成为国内外激光领域新的研究热点。锁模状态分为 2 类,即连续波锁模状态<sup>[1]</sup>和调 Q 锁模状态<sup>[2]</sup>。在某些应用中,要求连续的脉冲能量和高重复频率,这时需要连续波锁模掺铥光纤激光器,而调 Q 锁模状态具有更高的峰值功率和渐增的脉冲能量,在非线性和频率转换、微结构加工和激光医疗上有更多的应用。关于连续波锁模的掺铥光纤激光器,早在 1995 年,Nelson 等<sup>[3]</sup>就利用非线性偏振演化的方法进行了第一次报道。2008 年以来,随着光纤器件在这一波段更加成熟,越来越多的相关工作随之产生。2011 年,Wang 等<sup>[4]</sup>采用非线性偏振旋转技术,得到了可以工作在孤子态和类噪声态下的锁模掺铥光纤激光器。他们还在 2013 年,相继利用耦合到光纤端面上的石墨烯和单壁碳纳米管作为可饱和吸收体,实现了运转在常规孤子<sup>[5]</sup>和耗散孤子<sup>[6]</sup>状态下的掺铥光纤激光器。2012 年刘江等<sup>[7]</sup>报道了 2  $\mu\text{m}$  高能量全光纤结构被动锁模掺铥脉冲光纤激光器。2013 年王璞等<sup>[8]</sup>对 2  $\mu\text{m}$  波段掺铥脉冲激光器的研究进展和展望进行了报道。2014 年,Wang 等<sup>[9]</sup>利用非线性偏转技术实现了脉冲束和谐波锁模的掺铥光纤激光器。2014 年,Li 等<sup>[10]</sup>基于非线性光学环境技术,同样实现了孤子态和类噪声态的掺铥光纤激光器。2014 年,Jung 等<sup>[11]</sup>利用  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  拓扑绝缘体作为可饱和吸收体,得到了锁模掺铥光纤激光器。2014 年,Yin 等<sup>[12]</sup>通过光学强度调制器,利用主动锁模技术,实现了主动锁模的掺铥光纤激光器。关于调 Q 锁模光纤激光器,2009 年 Lin 等<sup>[13]</sup>以及 2013 年 Sheng 等<sup>[14]</sup>都在 1550 nm 波段实现了调 Q 锁模的掺铥光纤激光器,但在 2  $\mu\text{m}$  波段,关于拉锥石墨烯作为可饱和吸收体的调 Q 锁模光纤激光器还未见报道。

本文采用拉锥光纤的石墨烯作为可饱和吸收体,使用自行搭建的 1559 nm 的连续波掺铥光纤激光器作为抽运源。观察到了调 Q 及调 Q 锁模现象,当抽运功率达到 390 mW 时,开始出现调 Q 状态,重复频率为 19.5 kHz。当抽运功率达到 490 mW 时开始出现调 Q 锁模现象。调 Q 包络重复频率为 30.2 kHz,锁模脉冲重复频率为 19.5 MHz。当抽运功率达到 610 mW 时,锁模脉冲会填满调 Q 包络,此时调 Q 包络重复频率为 44.9 kHz,锁模脉冲重复频率仍为 19.5 MHz。

## 2 实验装置

如图 1 所示,全光纤结构的石墨烯被动调 Q 锁模掺铥光纤激光器采用环形腔结构,抽运光通过 1550/2000 nm 的波分复用器(WDM)被掺铥光纤吸收,再经过偏振控制器(PC)、拉锥光纤的石墨烯可饱和吸收体(GSA)、偏振无关隔离器(PI-ISO),保证了光的单向传输,最后经过 20/80 的激光分束器,其中 80% 的光反馈回去,其余 20% 的激光作为输出。其中抽运源采用实验室自己搭建 1559 nm 的连续波掺铥光纤激光器,经过 1 个双包层铒镱共掺放大器,最大输出功率可达 1.5 W。掺铥光纤为 Nufern 公司生产的单包层光纤,纤芯直径为 9  $\mu\text{m}$ ,包层直径为 125  $\mu\text{m}$ ,实验中使用的长度为 3 m,总腔长约为 10 m。

石墨烯作为一种新型可饱和吸收体,具有低制作成本、合适的可饱和调制深度、超快的回复时间和超宽的工作带宽等特点。本文中通过化学气相沉积法在铜基底上合成石墨烯薄膜,并利用 2 层复合结构的聚对苯二甲酸乙二醇酯和硅胶将该薄膜从铜基底上转移到聚甲基硅氧烷(PDMS)薄片上<sup>[15]</sup>。利用火焰燃烧技术对普通单模光纤(SMF)拉锥,锥区最小直径约为 8  $\mu\text{m}$ ,然后将带有石墨烯的 PDMS 薄片盖到拉锥光纤上,使石墨烯完全覆盖住锥区,再施加适当的压力保证石墨烯和光纤之间没有空隙,这样光到达拉锥光纤后,产生的倏逝场与石墨烯相互作用,达到可饱和吸收的目的。

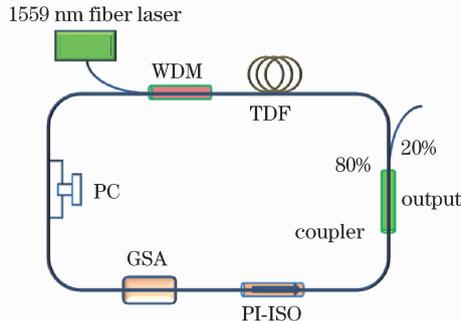


图 1 石墨烯被动调 Q 锁模掺铥光纤激光器实验装置图

Fig. 1 Schematic setup of the passively Q-switched mode-locked thulium-doped fiber laser

### 3 实验结果与分析

当抽运功率达到 390 mW 时,适当调节偏振控制器,光纤激光器得到了稳定的调 Q 输出。图 2(a)为采用分辨率为 0.05 nm 的光谱分析仪测得的调 Q 脉冲的光谱。中心波长为 1936.8 nm,光谱半峰全宽 (FWHM) 为 0.7 nm。图 2(b)为通过 2 GHz 示波器和 2  $\mu$ m 光电探测器得到的调 Q 脉冲序列,重复频率为 19.5 kHz,调 Q 脉冲宽度为 3.1  $\mu$ s。

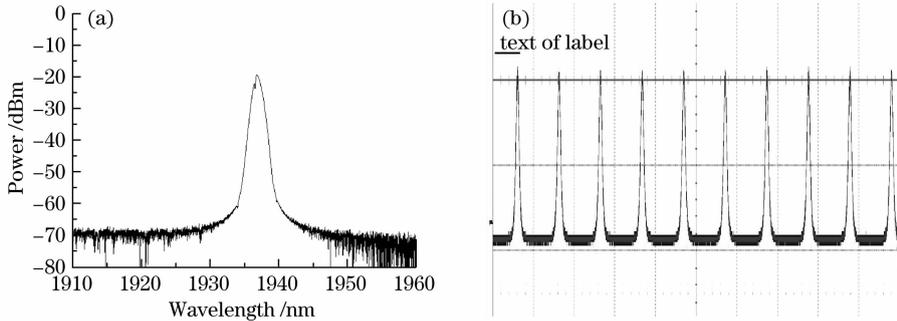


图 2 (a) 抽运功率为 390 mW 时激光器输出光谱; (b) 抽运功率为 390 mW 时激光器的脉冲序列  
Fig. 2 (a) Optical spectrum of the thulium-doped fiber laser at 390 mW; (b) pulse trains of the thulium-doped fiber laser at 390 mW

保持偏振控制器不动,提高抽运源的输出功率,当功率达到 490 mW 时,光纤激光器的输出由调 Q 转化为调 Q 锁模,图 3(a)为调 Q 锁模脉冲的光谱图,相比于调 Q 的光谱,中心波长在 1936.3 nm,而且光谱两端出现了明显的边带,说明产生了锁模脉冲,图 3(b)为对应的脉冲序列,可以看到调 Q envelopes 的顶端出现了锁模脉冲。调 Q 包络重复频率为 30.2 kHz,锁模脉冲重复频率仍为 19.5 MHz。

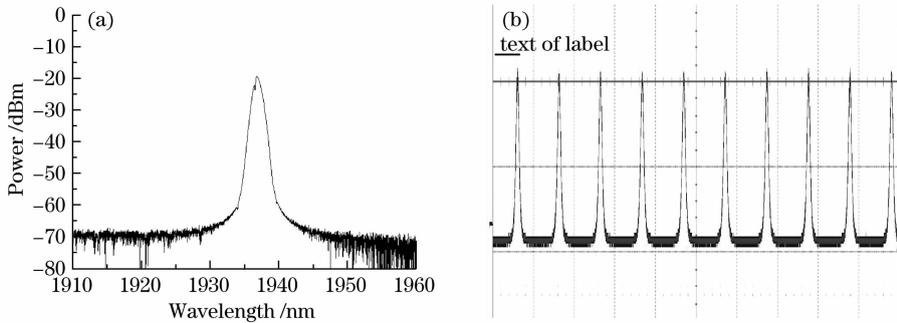


图 3 (a) 抽运功率为 490 mW 时激光器的输出光谱; (b) 抽运功率为 490 mW 时激光器的脉冲序列  
Fig. 3 (a) Optical spectrum of the thulium-doped fiber laser at 490 mW; (b) pulse trains of the thulium-doped fiber laser at 490 mW

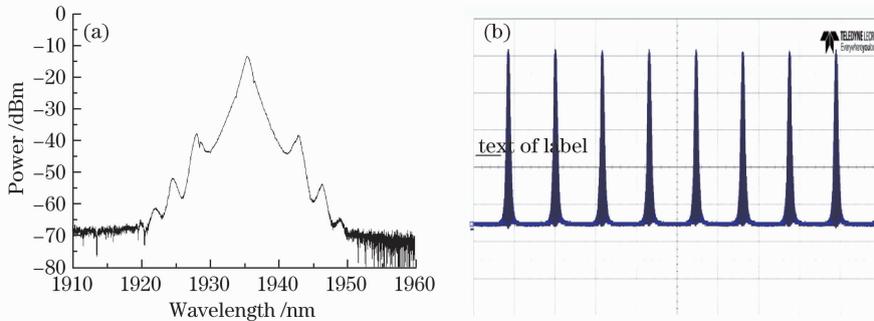


图 4 抽运功率为 610 mW 时激光器的输出光谱; (b) 抽运功率为 610 mW 时激光器的脉冲序列  
Fig. 4 (a) Optical spectrum of the thulium-doped fiber laser at 610 mW; (b) pulse trains of the thulium-doped fiber laser at 610 mW

随着抽运功率的进一步提高,掺铥光纤激光器输出状态保持为调 Q 锁模,但光谱逐渐展宽,而且锁模脉

冲逐渐填满调 Q 包络。如图 4(a)所示,在抽运功率为 610 mW 时,光谱中心波长为 1935.6 nm,可见,随着抽运功率的升高,中心波长会向短波漂移。此时光谱中又产生了新的边带,对应于更多锁模脉冲的产生。图 4(b)为对应的脉冲序列,锁模脉冲填满了调 Q 包络,此时调 Q 包络重复频率为 44.9 kHz,锁模脉冲重复频率仍为 19.5 MHz,这是由于锁模脉冲的重复频率只与腔长相关,由于总腔长约为 10 m,可知该重复频率为基频。图 5(a)和(b)分别为图 3(b)与图 4(b)中的单个调 Q 锁模脉冲的放大,输出功率为 4.1 mW。

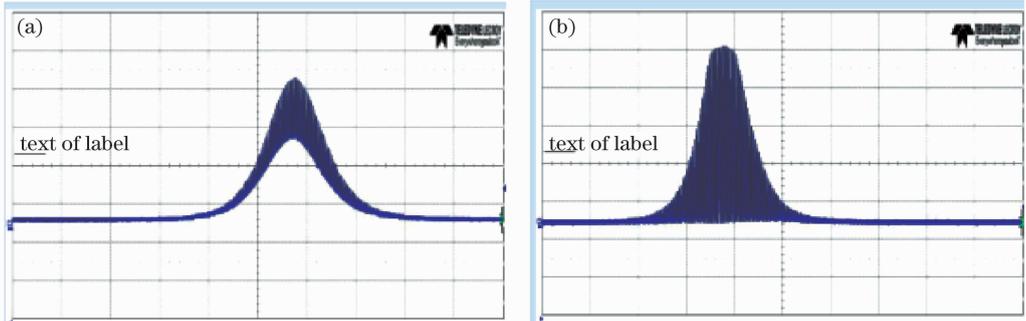


图 5 (a) 图 3(b)中单个调 Q 锁模脉冲;(b) 图 4(b)单个调 Q 锁模脉冲

Fig. 5 (a) Single Q-switched mode-locked pulse in Fig. 3(b); (b) single Q-switched mode-locked pulse in Fig. 4(b)

当抽运功率较低时,腔内能量较低,石墨烯可饱和吸收效应较弱,只能出现调 Q 脉冲,随着抽运功率的增加,腔内能量增加,石墨烯可饱和吸收效应增强,输出脉冲逐渐由调 Q 脉冲转化为调 Q 锁模脉冲,并且锁模脉冲逐渐填满调 Q 包络,调 Q 脉冲的重复频率及调 Q 锁模脉冲中调 Q 包络的重复频率随着抽运功率呈线性增长,如图 6 所示。当抽运功率为 610 mW 时,得到填满调 Q 包络的稳定调 Q 锁模脉冲,输出功率为 4.1 mW,转化效率为 0.67%,较低的转化效率是由于腔内较高的损耗引起的,损耗主要来源于 2 μm 光在普通单模光纤中较高的传输损耗以及石墨烯拉锥结构和器件较高的插入损耗。通过优化谐振腔参数,有望提高激光器性能。

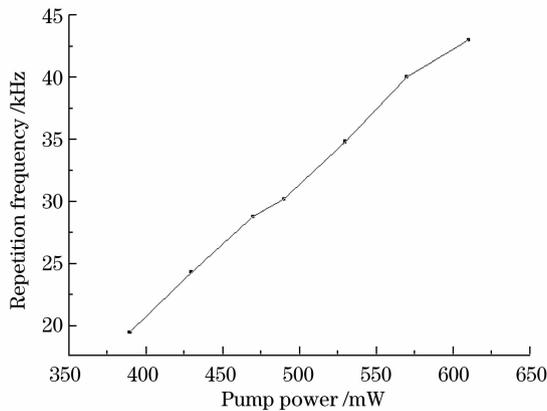


图 6 调 Q 重复频率随抽运功率的变化

Fig. 6 Q-switched repetition frequency as a function of pump power

## 4 结 论

报道了全光纤结构的石墨烯被动调 Q 锁模掺铒光纤激光器,研究了腔内脉冲随着抽运功率增加的演化过程,并最终得到了稳定的调 Q 锁模脉冲,当抽运功率达到 390 mW 时,开始出现调 Q 状态,重复频率为 19.5 kHz。当抽运功率达到 470 mW 时开始出现调 Q 锁模现象。调 Q 包络重复频率为 30.2 kHz,锁模脉冲重复频率为 19.5 MHz。当抽运功率达到 610 mW 时,锁模脉冲会填满调 Q 包络,此时调 Q 包络重复频率为 44.9 kHz,锁模脉冲重复频率仍为 19.5 MHz。该调 Q 锁模掺铒光纤激光器可广泛用于微结构加工、激光医疗、非线性频率转换等领域。

## 参 考 文 献

- 1 K Tamura, E P Ippen, H A Haus, *et al.*. 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode locked all-fiber ring laser[J]. *Opt Lett*, 1993, 18(13):1080—1082.
- 2 C Hönninger, R Paschotta, F Morier-Genoud. Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking[J]. *J Opt Soc Am B*, 1999, 16(1):46—56.
- 3 L E Nelson, E P Ippen, H A Haus. Broadly tunable sub-500 fs pulses from an additive-pulse mode-locked thulium-doped fiber ring laser[J]. *Appl Phys Lett*, 1995, 67(1):19—21.
- 4 Q Wang, T Chen, B Zhang. All-fiber passively mode-locked thulium-doped fiber ring oscillator operated at solitary and noise like modes[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(19): 3750—3752.
- 5 Qingqing Wang, Tong Chen, Botao Zhang. All-fiber passively mode-locked thulium-doped fiber ring laser using optically deposited graphene saturable absorbers[J]. *Appl Phys Lett*, 2013, 102 (13):131137.
- 6 Qingqing Wang, Tong Chen, Mingshan Li. All-fiber ultrafast thulium-doped fiber ring laser with dissipative soliton and noise-like output in normal dispersion by single-wall carbon nanotubes[J]. *Appl Phys Lett*, 2013, 103(1):011103.
- 7 Liu Jiang, Xu Jia, Wang Qian, *et al.*. High-pulse-energy passively mode-locked 2.0  $\mu\text{m}$  thulium-doped ultrafast all-fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6):0602009.  
刘 江, 徐 佳, 王 潜, 等. 高能量全光纤结构被动锁模 2.0  $\mu\text{m}$  掺铥超短脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(6):0602009.
- 8 Wang Pu, Liu Jiang. Progress and prospect on ultrafast Tm-doped fiber lasers at 2  $\mu\text{m}$  wavelength[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0601002.  
王 璞, 刘 江. 2.0  $\mu\text{m}$  掺铥超短脉冲光纤激光器研究进展及展望[J]. *中国激光*, 2013, 40(6):0601002.
- 9 Xiong Wang, Pu Zhou, Xiaolin Wang. Pulse bundles and passive harmonic mode locked pulses in Tm-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. *Opt Express*, 2014, 22(5):6148—6153.
- 10 Jianfeng Li, Zuxing Zhang, Zhongyuan Sun. All-fiber passively mode-locked Tm-doped NOLM-based oscillator operating at 2- $\mu\text{m}$  in both soliton and noisy-pulse regimes[J]. *Opt Express*, 2014, 22(7):7875—7882.
- 11 Minwan Jung, Junsu Lee, Joonhoi Koo. A femtosecond pulse fiber laser at 1935 nm using a bulk-structured  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  topological insulator[J]. *Opt Express*, 2014, 22(7):7865—7874.
- 12 Ke Yin, Bin Zhang, Weiqiang Yang. Flexible picosecond thulium-doped fiber laser using the active mode-locking technique[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(14):4259—4262.
- 13 Kuei-Huei Lin, Jung-Jui Kang, Hsiao-Hua Wu. Manipulation of operation states by polarization control in an erbium-doped fiber laser with a hybrid saturable absorber[J]. *Opt Express*, 2009, 17(6):4806—4814.
- 14 Qiwen Sheng, Ming Feng, Wei Xin. Actively manipulation of operation states in passively pulsed fiber lasers by using graphene saturable absorber on microfiber[J]. *Opt Express*, 2013, 21(12):14859—14866.
- 15 Z B Liu, M Feng, W S Jiang. Broadband all-optical modulation using a graphene-covered-microfiber[J]. *Laser Phys Lett*, 2013, 10(6): 065901.

栏目编辑: 王晓球