

# 掺铥光纤激光器中的孤子束和高阶谐波锁模

王光斗, 杨光, 刘艳格, 王志

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 300350

**摘要** 将单层石墨烯覆盖在拉锥光纤上,光通过倏逝场和石墨烯相互作用实现锁模脉冲输出。当抽运功率调到阈值 230 mW 时,可以实现自启动的锁模脉冲输出;将抽运功率固定在 300 mW 处,调节偏振控制器可实现一个孤子束中包含 2~6 个脉冲的可控脉冲数输出;将抽运功率固定在 450 mW 处,调节偏振控制器可实现不同阶次的谐波锁模,最高实现 117 阶谐波锁模,此时脉冲重复频率高达 2.412 GHz。

**关键词** 激光器; 孤子束; 谐波锁模; 被动锁模; 石墨烯

**中图分类号** TN248

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0801011

## Soliton Bundles and High-Order Harmonic Mode-Locked in Tm-Doped Fiber Laser

Wang Guangdou, Yang Guang, Liu Yange, Wang Zhi

*Key Laboratory of Optical Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China*

**Abstract** A section of graphene film is transferred on the tapered fiber and the light interacts with graphene by the evanescent field so as to generate the mode-locked pulse. When the pump power is transferred to the threshold of 230 mW, the self-starting mode-locked pulse can be realized. Fixing the pump power at 300 mW, soliton bundles with controlled 2-6 sub-pulses are generated by adjusting the polarization controller. Fixing the pump power at 450 mW, different order harmonic mode-locked pulses can be achieved by adjusting the polarization controller. The highest order of harmonic mode-locked pulse is 117, and the corresponding pulse repetition frequency is 2.412 GHz.

**Key words** lasers; soliton bundles; harmonic mode-locked; passive mode-locked; graphene

**OCIS codes** 140.3510; 190.4400; 140.4050; 190.2620

## 1 引言

掺铥光纤(TDF)激光器运转在 2  $\mu\text{m}$  波段,处于人眼安全波段,其在生物医学、光通信、超快光学、非线性频率转换、材料加工等领域具有诱人的应用前景<sup>[1-5]</sup>,从而引起研究人员的广泛关注。实现超短脉冲激光输出的主要方式是锁模,锁模分为主动锁模和被动锁模<sup>[6]</sup>。典型的被动锁模技术有半导体可饱和吸收镜(SESAM)<sup>[7]</sup>、碳纳米管(CNT)<sup>[8]</sup>、石墨烯可饱和吸收体(GSA)<sup>[9]</sup>等二维材料、非线性偏振环形镜<sup>[10]</sup>和非线性偏振旋转技术<sup>[11]</sup>。与 SESAM 等传统可饱和吸收体相比,石墨烯具有超快非线性光学响应、宽带可饱和吸收特性、高损伤阈值、易与光纤集成等优点<sup>[12]</sup>。在被动锁模光纤激光器中有两种值得注意的脉冲状态:脉冲束和谐波锁模。脉冲束是被动锁模激光器中的一个重要现象<sup>[13-14]</sup>,它的出现主要归因于强的非线性效应使激光腔的脉冲能量量子化,从而导致脉冲分裂。被动谐波锁模具有独特的优点,如能够产生超高重复频率和超短锁模脉冲序列、便

**收稿日期:** 2017-03-10; **收到修改稿日期:** 2017-04-24

**基金项目:** 国家自然科学基金(11674177)、天津市自然科学基金(16JJCZDJC31000)

**作者简介:** 王光斗(1993—),男,硕士研究生,主要从事石墨烯、微光纤器件及其在激光器和传感领域的应用方面的研究。

E-mail: wgdnu@163.com

**导师简介:** 刘艳格(1973—),女,博士,教授,主要从事光纤光子学与现代光通信传感技术等方面的研究。

E-mail: ygliu@nankai.edu.cn(通信联系人)

于调节谐波脉冲重复频率等<sup>[15-17]</sup>,其重复频率可以高达几十吉赫兹,脉冲宽度大多在皮秒量级,因此在很多领域具有重要的应用,如光学时钟同步、精密计量、高重复频率超连续光源的抽运源、光通信系统等。

1991年, Malomed<sup>[18]</sup>首次从理论上预测了两个孤子束缚态的存在,此后,多个实验小组在实验中证实了两个或多个孤子在腔内的存在;特别地,当多个孤子均匀地分布在激光腔内时,就形成了谐波锁模。2014年, Wang等<sup>[19]</sup>在掺铥光纤激光器中通过非线性偏振旋转方法实现了一个孤子束中最多包含17个脉冲输出,同时实现了最高15阶谐波锁模;2016年, Jia等<sup>[16]</sup>在掺铥光纤激光器中通过非线性偏振旋转方法实现了最高128阶谐波锁模,但脉冲强度抖动比较大。在以往的研究中,大多数掺铥光纤激光器都是通过非线性偏振旋转等方法来实现高阶谐波锁模输出。

本文利用石墨烯作为可饱和吸收体,在2 μm波段掺铥光纤激光器中产生孤子束和高阶谐波锁模。通过将石墨烯覆盖在单模拉锥光纤上形成可饱和吸收体,利用该可饱和吸收体的偏振相关特性,调节偏振控制器处于不同位置,实现一个孤子束中包含2~6个脉冲,此时中心波长位于1950 nm左右;然后,提高抽运功率并调节偏振控制器,分别获得了10、50、90、117阶谐波锁模输出,最高重复频率为2.412 GHz。

## 2 实验装置

掺铥光纤激光器实验装置如图1所示。以中心波长为1559 nm的自制连续激光器作为抽运源,以3 m长的掺铥光纤(Nufern公司, SM-TSF-9/125)作为增益介质,测得掺铥光纤在1559 nm波长处的吸收系数为13 dB/m。抽运光通过1550/2000 nm波分复用器(WDM)导入掺铥光纤,偏振无关隔离器(PI-ISO)用来保持光在激光腔中单向传输,偏振控制器(PC)用来调节腔内激光的偏振态。拉锥光纤上的石墨烯作为可饱和吸收体(GSA),其制备过程为:将标准单模光纤(SMF28)通过火焰刷法拉锥到直径为6 μm左右,整个锥区长度为3 cm,然后将由聚二甲基硅氧烷(PDMS)聚合物支撑的1 cm×1 cm的单层石墨烯覆盖在拉锥光纤的锥区。10:90的光耦合器(OC)用来将腔内激光导出,以便于后续激光参数检测。分辨率为0.05 nm的光谱分析仪(OSA)(Yokogawa AQ6375)被用来探测激光光谱,12.5 GHz的光电探测器(Newport 818-BB)和带宽为2 GHz的数字示波器用来探测脉冲序列。

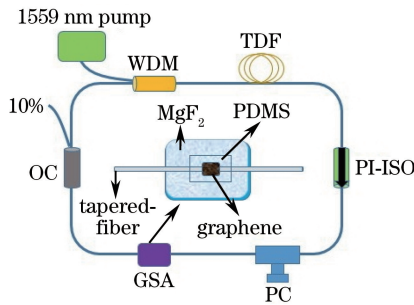


图1 掺铥光纤激光器实验装置

Fig. 1 Schematic setup of Tm-doped fiber laser

## 3 实验结果与分析

当抽运源的输出功率被放大到230 mW时,可以观察到稳定的重复频率为20.66 MHz的基频锁模脉冲输出,此重复频率和激光总腔长相吻合,如图2所示,此时中心波长为1954.07 nm,3 dB带宽为4.1 nm。慢慢增大抽运光功率到300 mW,仔细调节偏振控制器可以观察到一个脉冲分裂成两个脉冲,将抽运功率固定不变,接着调节偏振控制器,可以实现一个孤子束中包含2~6个脉冲的可控脉冲数输出,结果如图3所示。从图中可以看出,孤子束中各个脉冲之间相邻间隔并不严格相等,但各脉冲强度基本一致,有轻微的起伏,这可能是脉冲之间的竞争所引起的。孤子束的形成可以解释为激光腔内大的非线性以及峰值钳制效应导致的脉冲分裂,随着孤子束中脉冲数的增加,光谱由长波方向 Kelly 旁瓣强度低于短波方向 Kelly 旁瓣强度慢慢变为短波方向 Kelly 旁瓣强度低于长波方向 Kelly 旁瓣强度,这说明随着脉冲个数增多,脉冲与长波方向色散波的相互作用增强。

继续增大抽运光功率到450 mW时,开始出现10阶的谐波锁模,此时脉冲重复频率为207 MHz,固定

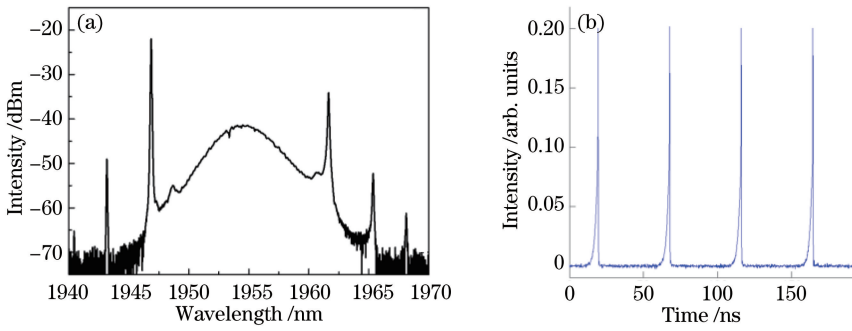


图 2 基频锁模的(a)光谱及(b)脉冲序列

Fig. 2 (a) Spectrum and (b) pulse train of fundamental mode-locking

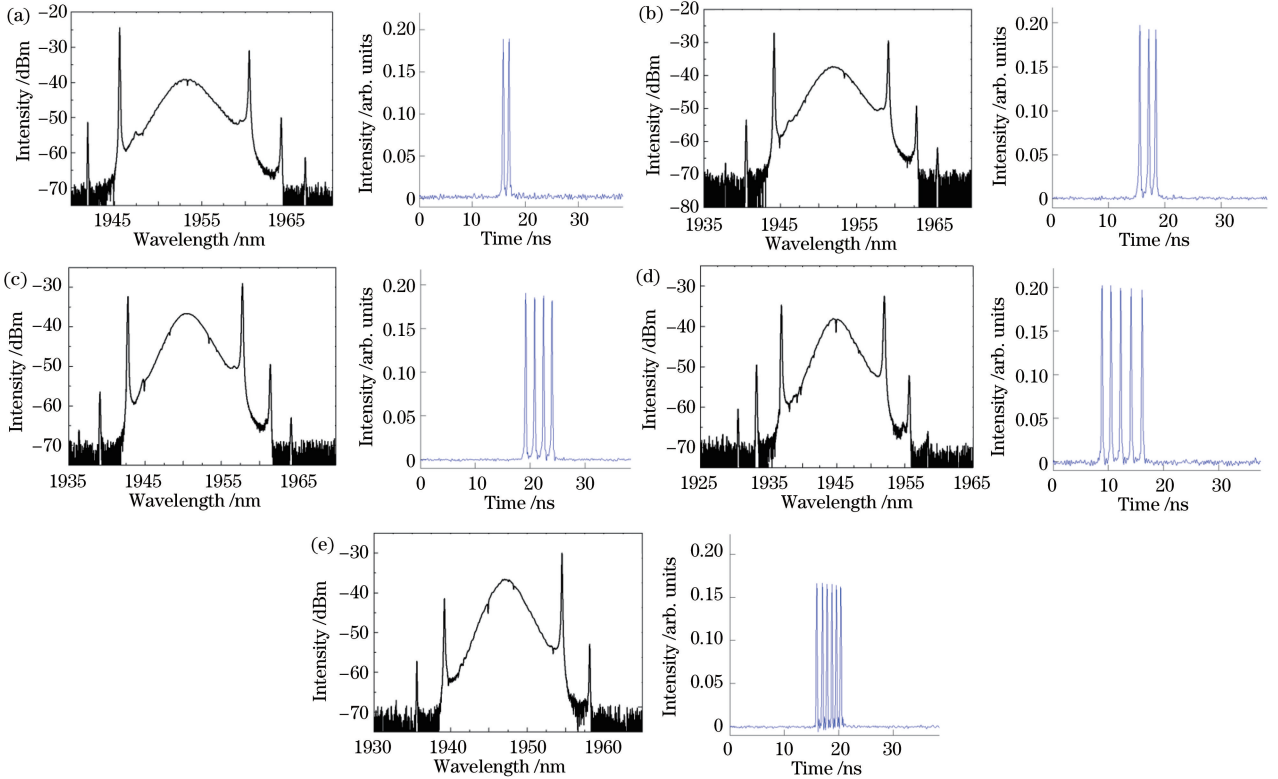


图 3 掺铥锁模光纤激光器中不同数量脉冲束的光谱及脉冲序列。(a) 2 个脉冲束;(b) 3 个脉冲束;  
(c) 4 个脉冲束;(d) 5 个脉冲束;(e) 6 个脉冲束

Fig. 3 Spectrum and pulse train of different pulse bundles in Tm-doped mode-locked fiber laser.

(a) 2 pulse bundles; (b) 3 pulse bundles; (c) 4 pulse bundles; (d) 5 pulse bundles; (e) 6 pulse bundles

抽运光功率不变,仔细调节偏振控制器,分别可以得到 50, 90, 117 阶谐波锁模脉冲,脉冲重复频率分别为 1.041, 1.868, 2.412 GHz, 即该激光器最大脉冲重复频率达 2.412 GHz, 结果如图 4 所示。图 5 给出了测量得到的 50 阶和 117 阶谐波锁模脉冲的射频频谱, 从图中可以看出, 50 阶谐波锁模脉冲射频频谱的信噪比约为 33 dB, 说明脉冲强度比较稳定; 随着谐波锁模阶次增加到 117 阶, 虽然脉冲强度的稳定性变得稍差, 但从图 5(b) 中可以看出此时信噪比仍大于 20 dB, 说明仍具有较高的稳定性。

## 4 结 论

将石墨烯作为可饱和吸收体, 实现了 2  $\mu\text{m}$  波段掺铥光纤激光器中孤子束和谐波锁模输出。该激光器的基频重复频率为 20.66 MHz, 实现了一个孤子束中包含 2~6 个脉冲的孤子束输出; 增大抽运光功率并调节偏振控制器, 分别实现了 10, 50, 90, 117 阶谐波锁模, 脉冲最高重复频率达到 2.412 GHz。该激光器有望

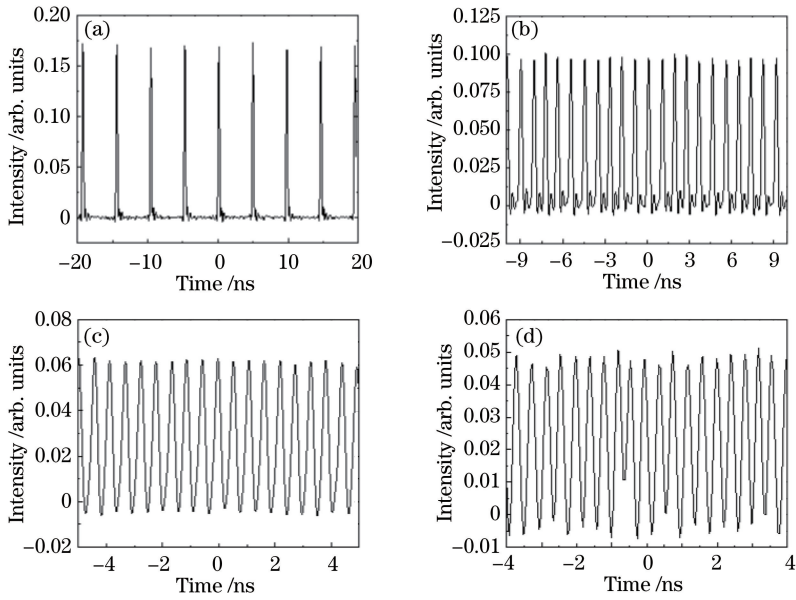


图 4 不同阶次谐波锁模脉冲序列。(a) 10 阶;(b) 50 阶;(c) 90 阶;(d) 117 阶

Fig. 4 Different order harmonic mode-locked pulse train. (a) 10th order; (b) 50th order; (c) 90th order; (d) 117th order

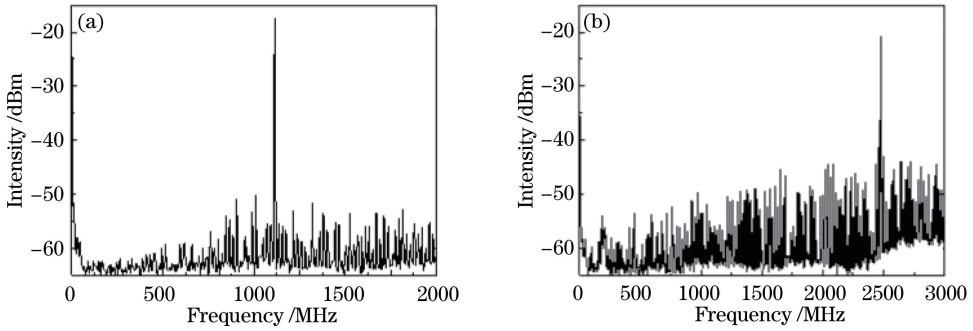


图 5 (a) 50 阶和(b) 117 阶谐波锁模脉冲射频频谱

Fig. 5 Radio frequency spectra of (a) 50th and (b) 117th order harmonic mode-locked pulse

在光学时钟同步、精密计量、光通信系统等领域得到应用。

### 参 考 文 献

[1] Geng J, Wang Q, Jiang S.  $2\ \mu\text{m}$  fiber laser sources and their applications[C]. SPIE, 2011, 8164: 816409.

[2] Polder K D, Suzanne B. Treatment of melasma using a novel 1927 nm fractional thulium fiber laser: a pilot study[J]. Dermatologic Surgery, 2012, 38(2): 199-206.

[3] Liu Peng, Wang Tianshu, Zhang Peng, *et al.* Multi-wavelength thulium-doped mode-locked fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(6): 0614003.  
刘 鹏, 王天枢, 张 鹏, 等. 基于非线性偏振旋转效应的多波长掺铥锁模光纤激光器[J]. 光子学报, 2016, 45(6): 0614003.

[4] Li Z, Heidt A M, Simakov N, *et al.* Diode-pumped wideband thulium-doped fiber amplifiers for optical communications in the 1800-2050 nm window[J]. Optics Express, 2013, 21(22): 26450-26455.

[5] Jackson S D, King T. High-power diode-cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser[J]. Applied Physics B, 2003, 77 (5): 489-491.

[6] Fermann M E, Galvanauskas A, Sucha G, *et al.* Fiber-lasers for ultrafast optics[J]. Applied Physics B, 1997, 65(2): 259-275.

[7] Cheng Meng, Zhang Bingyuan, Li Gang, *et al.* Study on SESAM passively-mode-locked Nd:YAG laser[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(6): 646-648.  
陈 檬, 张丙元, 李 港, 等. 半导体可饱和吸收镜被动锁模 Nd:YAG 激光器的研究[J]. 中国激光, 2004, 31(6):

646-648.

- [8] Song Qiuyan, Chen Genxiang, Tan Xiaolin, *et al.* Multi-wavelength passively mode-locked laser based on single-walled carbon nanotube[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0102002.  
宋秋艳, 陈根祥, 谭晓琳, 等. 基于单壁碳纳米管的多波长被动锁模激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0102002.
- [9] Xia H, Li H, Wang Z, *et al.* Nanosecond pulse generation in a graphene mode-locked erbium-doped fiber laser[J]. Optics Communications, 2014, 330: 147-150.
- [10] Salhi M, Haboucha A, Leblond H, *et al.* Theoretical study of figure-eight all-fiber laser[J]. Physical Review A, 2008, 77(3): 1012-1015.
- [11] Zheng W, Ruan S, Zhang M, *et al.* Switchable multi-wavelength erbium-doped photonic crystal fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 50(2): 145-149.
- [12] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, *et al.* Graphene photonics and optoelectronics[J]. Nature Photonics, 2010, 4(9): 611-622.
- [13] Meng Y, Zhang S, Li X, *et al.* Multiple-soliton dynamic patterns in a graphene mode-locked fiber laser[J]. Optics Express, 2012, 20(6): 6685-6692.
- [14] Song Y F, Li L, Zhang H, *et al.* Vector multi-soliton operation and interaction in a graphene mode-locked fiber laser[J]. Optics Express, 2013, 21(8): 10010-10018.
- [15] Kang M S, Joly N Y, Russell P S. Passive mode-locking of fiber ring laser at the 337th harmonic using gigahertz acoustic core resonances[J]. Optics Letters, 2013, 38(4): 561-563.
- [16] Jia Q, Wang T, Ma W, *et al.* Passively harmonic mode-locked pulses in thulium-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. Optical Engineering, 2016, 55(10): 106121.
- [17] Hu Tonghuan, Jiang Guobao, Chen Yu, *et al.* Passive harmonic mode-locking in Er-doped fiber laser based on mechanical exfoliated graphene saturable absorber[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0802013.  
胡同欢, 蒋国保, 陈宇, 等. 机械剥离石墨烯被动谐波锁模掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0802013.
- [18] Malomed B A. Bound solitons in the nonlinear Schrödinger-Ginzburg-Landau equation[J]. Physical Review A, 1991, 44(10): 6954-6957.
- [19] Wang X, Zhou P, Wang X, *et al.* Pulse bundles and passive harmonic mode-locked pulses in Tm-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 6147-6153.