

基于石墨烯可饱和吸收体的被动锁模、被动调 Q 掺镱光纤激光器

刘 江¹ 吴思达² 王 科¹ 曹 镱¹ 杨全红² 王 璞¹

(¹北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

²天津大学化工学院, 天津 300072

摘要 报道了石墨烯材料作为可饱和吸收体的被动锁模、被动调 Q 掺镱全光纤激光器。采用环形腔结构, 在抽运功率为 1.2 W 时, 有稳定的重复频率为 1.04 MHz 的自锁模脉冲发生, 平均输出功率为 46 mW; 当抽运功率增加到 2.3 W 时, 平均输出功率为 170 mW, 相应的单脉冲能量高达 163 nJ, 脉冲宽度约为 680 ps。采用线性腔结构, 实现了石墨烯被动调 Q 激光脉冲输出, 其重复频率在 140~257 kHz 可调, 最窄激光脉冲宽度为 70 ns, 最大平均功率为 12 mW, 相应最大单脉冲能量为 46 nJ。

关键词 激光器; 光纤激光器; 高脉冲能量; 石墨烯; 锁模; 被动调 Q

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0802001

Passively Mode-Locked and Q-Switched Yb-Doped Fiber Lasers with Graphene-Based Saturable Absorber

Liu Jiang¹ Wu Sida² Wang Ke¹ Cao Yi¹ Yang Quanhong² Wang Pu¹

(¹*Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*
²*School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract A graphene-based passively mode-locked and passively Q-switched Yb-doped fiber laser is reported. Stable mode-locked pulse train occurs at about 1.2 W incident pump power and the pulse repetition rate is 1.04 MHz in a ring cavity configuration; increasing the incident pump power to 2.3 W, the pulse width is measured to be about 680 ps and the output power is 170 mW, which corresponds to single pulse energy of 163 nJ. Graphene-based passively Q-switched operation is also demonstrated with pulse width of 70 ns and maximum output power of 12 mW in a linear cavity configuration, which corresponds to single pulse energy of 46 nJ. The repetition rate is tunable from 140 to 257 kHz along with the increase of the pump power.

Key words lasers; fiber lasers; high pulse energy; graphene; mode-locked; passively Q-switched

OCIS codes 140.3510; 140.3540; 140.4050; 160.4330

1 引 言

光纤激光器与其他类型激光器相比, 具有效率高、体积小、光束质量好等优点, 可广泛应用于光纤通信、大气光学、材料加工等领域^[1~3]。特别是高平均功率、高重复频率的被动锁模或被动调 Q 脉冲光

纤激光器在精密激光微加工等领域具有无法比拟的优势。通常实现锁模、被动调 Q 的技术有半导体可饱和吸收镜 (SESAM)、碳纳米管 (SWNT) 等技术。然而 SESAM 具有制作工艺复杂、生产成本低、可饱和吸收光谱范围相对较窄等不足。而 SWNT 与

收稿日期: 2011-03-01; 收到修改稿日期: 2011-03-21

基金项目: 北京市自然科学基金重点项目 (KZ201100050011) 资助课题。

作者简介: 刘 江 (1982—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率光纤激光器、高功率光纤放大器等方面的研究。

E-mail: liujiang@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 王 璞 (1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤激光器、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件等方面的研究。E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn (通信联系人)

SESAM 相比具有成本低廉、可饱和吸收光谱范围宽等优势,但是制作 SWNT 可饱和吸收体时其直径的不可控性,会使 SWNT 对某些特定的激光波长,增加插入损耗,导致可饱和吸收效应不明显等问题。最近,石墨烯材料被发现可作为一种新型的可饱和吸收体用于光纤激光器锁模或被动调 Q^[4,5]。

石墨烯是由单层碳原子紧密堆积成二维蜂窝状晶格结构的一种碳质新材料,是构建其他维度碳质材料(如零维富勒烯、一维碳纳米管、三维石墨)的基本单元。2004 年,Novoselov 等^[6]首次通过机械剥离的方法从大块石墨上得到了这种纳米级的石墨烯薄片。由于石墨烯具有优异的电学、力学和光学性能,可望在高性能电子器件、复合材料、场发射材料、气体传感器及能量存储等领域得到广泛的应用,近年来石墨烯新颖的物理特性已经被深入地研究^[7,8]。2009 年,Bao 等^[4]首次证实了原子层级的石墨烯作为可饱和吸收体用于掺铒光纤激光器锁模。此后大多数的研究一直专注于石墨烯作为可饱和吸收体在 1.5 μm 波段激光锁模、调 Q 性能的优化。如石墨烯可饱和吸收体实现了低于 200 fs 的超快掺铒光纤激光器、单脉冲能量达 7.3 nJ 的石墨烯锁模掺铒光纤激光器以及基于石墨烯的被动调 Q 掺铒光纤激光器^[5,9,10]。尽管石墨烯饱和吸收体的工作波段较宽,覆盖了从可见光到中红外的波长范围^[11,12],但是石墨烯可饱和吸收体在其他波段锁模、调 Q 的相关报道很少。最近,关于石墨烯锁模的掺铒光纤激光器也见报道^[13];其最大平均输出功率为 0.37 mW,重复频率为 0.9 MHz,相应的单脉冲能量为 0.41 nJ。

本文利用沉积在宽带反射镜上的石墨烯薄膜作为可饱和吸收体,实现了高脉冲能量输出的石墨烯被动锁模、被动调 Q 掺铒光纤激光器。采用环形腔结构,获得了重复频率为 1.04 MHz 的锁模激光脉冲,其最大平均输出功率为 170 mW,相应的单脉冲能量高达 163 nJ。此外,采用线形腔结构,实现了石墨烯作为可饱和吸收体用于掺铒光纤激光器的被动调 Q,产生了 70 ns 的最窄脉冲宽度,重复频率在 140~257 kHz 连续可调。

2 石墨烯可饱和吸收体

实验中所使用的石墨烯可饱和吸收体是通过沉积石墨烯-聚乙烯醇(石墨烯-PVA)溶液的方法来得到的。采用真空低温剥离法制备得到 40 mg 石墨烯,然后通过高强度超声波振荡与 60 mL PVA 水溶

液(质量浓度为 4 mg/mL)进行 2 h 混合。经过 48 h 静置后,石墨烯-PVA 混合溶液没有发现沉淀,得到均匀的石墨烯-PVA 悬浊液。将宽带全反射镜浸入悬浊液 48 h 使其与石墨烯充分接触,最后干燥 3 h 后宽带全反射镜就沉积了石墨烯薄膜。实验所用的石墨烯是通过低温真空剥离的方法来制备的^[14]。

3 石墨烯被动锁模光纤激光器

3.1 实验装置

如图 1 所示,石墨烯被动锁模掺铒光纤激光器采用了环形腔结构。主要包括长约 3 m 的双包层掺铒光纤(CorActive DCF-YB-6/128, YDF),纤芯直径为 6.5 μm,数值孔径为 0.16,内包层直径为 128 μm,数值孔径为 0.45,以及 180 m 长的 1060-XP 单模光纤(SMF)。抽运源的中心波长为 975 nm,最大输出功率为 10 W(Lumics LU09XXT100)。激光脉冲从耦合器的 90%一端输出,10%的一端反馈回激光腔内,而偏振控制器则用于锁模脉冲的优化。

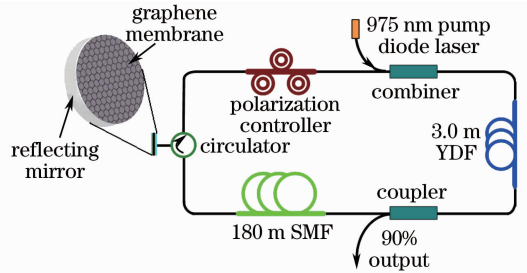


图 1 石墨烯锁模光纤激光器实验装置图
Fig. 1 Schematic setup of the graphene mode-locked fiber laser

3.2 实验结果与分析

适当地调节偏振控制器,在抽运功率为 1.2 W 时光纤激光器产生了稳定的重复频率为 1.04 MHz 的锁模激光脉冲,重复频率与激光器的腔长相吻合。

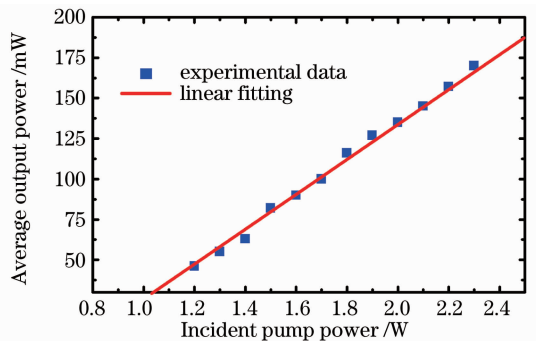


图 2 平均输出功率随抽运功率的变化
Fig. 2 Average output power with the increase of pump power

抽运功率增加到 2.3 W 时,平均输出功率达到了 170 mW,相应的单脉冲能量达到了 163 nJ。进一步增加抽运功率将产生脉冲分裂。如图 2 所示,锁模激光的平均输出功率几乎随抽运功率成线性增加。

图 3 为锁模激光脉冲的光谱,中心波长为 1074.7 nm,通过分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪测得光谱半峰全宽(FWHM)为 0.12 nm。微秒时间段内示波器测量的锁模脉冲串如图 4 所示,总是单脉冲,没有出现脉冲分裂或多脉冲现象。图 5 为通过 4 GHz 示波器和 5 GHz 光电探头测得的激光脉冲宽度 W 。

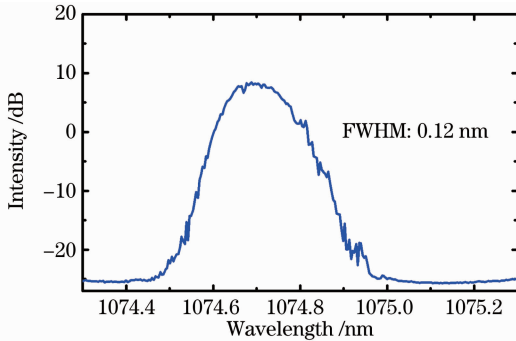


图 3 石墨烯锁模光纤激光器的输出光谱

Fig. 3 Optical spectrum of the mode-locked fiber laser

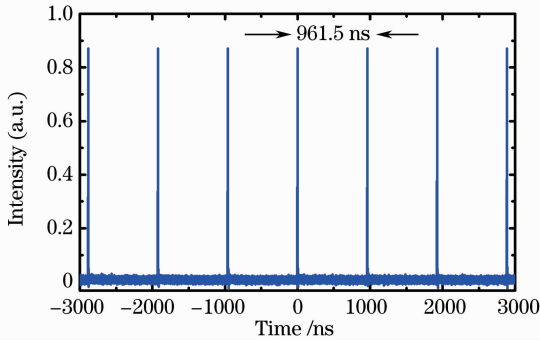


图 4 石墨烯锁模光纤激光脉冲串

Fig. 4 Pulse train of the mode-locked fiber laser

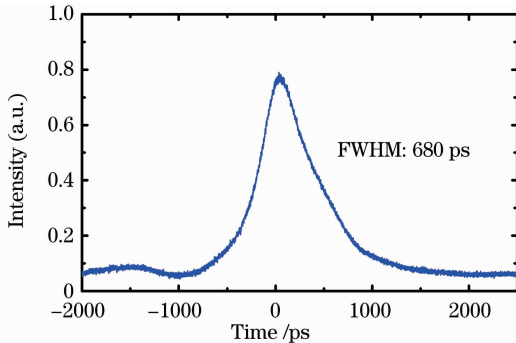


图 5 石墨烯锁模激光脉冲宽度

Fig. 5 Pulse duration of the mode-locked pulse

4 石墨烯被动调 Q 光纤激光器

4.1 实验装置

如图 6 所示,石墨烯被动调 Q 掺镱光纤激光器采用了线形腔结构。整个线形腔的长度约 15 cm,增益光纤为一段约 10 cm 的掺镱双包层光纤(CorActive DCF-YB-6/128, YDF),纤芯直径为 6.5 μm ,数值孔径为 0.16,内包层直径为 128 μm ,数值孔径为 0.45。抽运源为中心波长为 974 nm 的单模半导体激光器,最大抽运功率 600 mW。在增益光纤的一端熔接有窄带高反射率的光纤布拉格光栅(FBG, $R=80\%$, FWHM 为 0.5 nm)作为激光脉冲输出端,增益光纤的另一端与沉积在全反射镜上的石墨烯可饱和吸收体直接耦合。

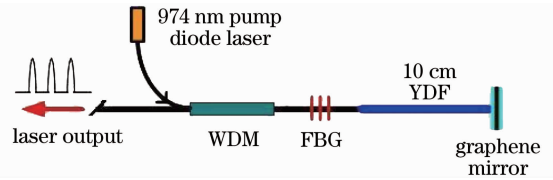


图 6 石墨烯被动调 Q 光纤激光器实验装置图

Fig. 6 Schematic setup of the graphene passively Q-switched fiber laser

4.2 实验结果与分析

当抽运功率为 P_p 约为 120 mW 时,掺镱光纤激光器开始产生稳定的调 Q 激光脉冲,此时脉冲的重复频率为 140 kHz,平均输出功率约为 1.5 mW。如图 7 所示,当抽运功率增加到 224 mW 时,激光重复频率也相应增加到了 217 kHz,脉冲宽度约为 170 ns,实验中用窄带高反射率的 FBG 作为激光脉冲的输出端,通过分辨率为 0.02 nm 的光谱仪测量输出脉冲的光谱,其中心波长为 1064.2 nm,FWHM 约为 0.13 nm,如图 8 所示。

如图 9, 10 所示,当激光抽运功率增加到

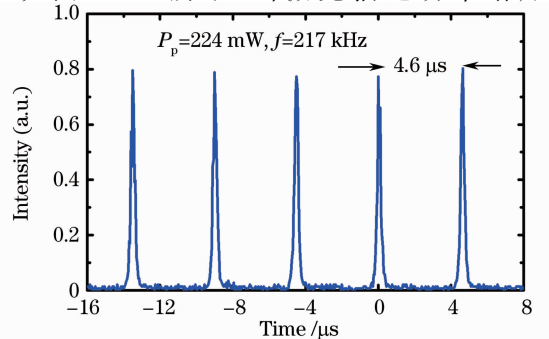


图 7 石墨烯被动调 Q 光纤激光的稳定脉冲串

Fig. 7 Stable pulse train of the graphene passively Q-switched fiber laser

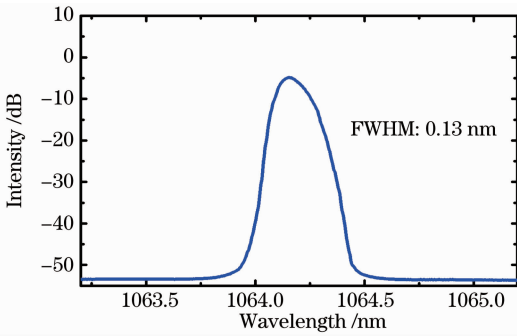


图 8 石墨烯被动调 Q 光纤激光器的输出光谱
Fig. 8 Optical spectrum of the graphene passively Q-switched fiber laser

360 mW 时, 最大平均输出功率为 12 mW, 激光单脉冲能量为 46 nJ, 激光脉冲宽度为 70 ns。抽运功率从 120 mW 增加到 360 mW 的过程中, 激光重复频率在 140~257 kHz 可调, 平均输出功率也随着抽运功率成线性增加。在增加抽运功率的过程中, 石墨烯可饱和吸收体的调制深度也增加, 所以激光脉冲宽度也随着抽运功率的增加而减小。

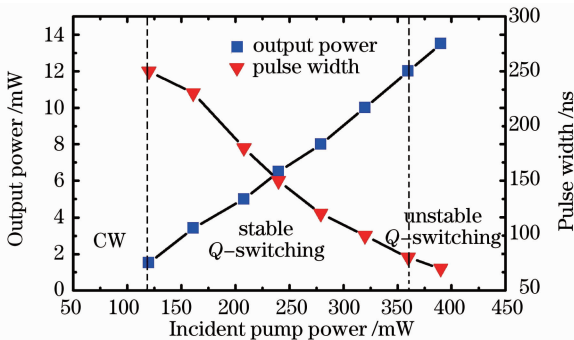


图 9 输出功率和脉冲宽度随抽运功率的变化
Fig. 9 Output power and pulse width with the increase of pump power

如图 11 所示, 当抽运功率大于 360 mW 后, 脉冲宽度也进一步减小, 脉宽减小到 56 ns, 但调 Q 脉冲串将变得不稳定。

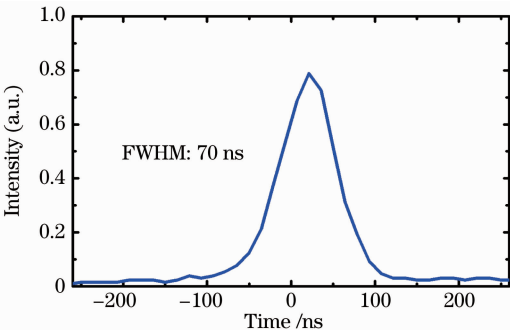


图 10 石墨烯被动调 Q 光纤激光器的最窄脉宽
Fig. 10 Minimal pulse width of the graphene passively Q-switched fiber laser

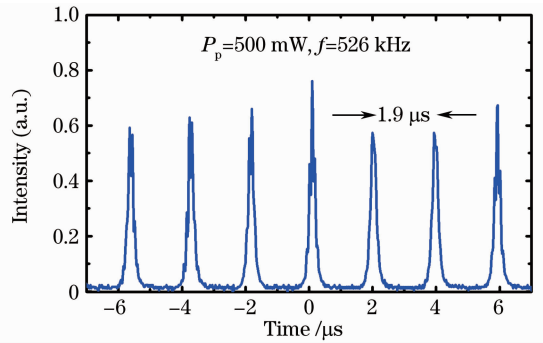


图 11 石墨烯被动调 Q 光纤激光的不稳定脉冲串
Fig. 11 Unstable pulse train of the graphene passively Q-switched fiber laser

5 结 论

研究了基于石墨烯可饱和吸收体的掺镱光纤激光器的被动锁模和被动调 Q。在环形腔情况下, 产生了稳定的重复频率为 1.04 MHz 的锁模脉冲串, 最高单脉冲能量达到了 163 nJ, 激光脉冲宽度为 680 ps。在线形腔情况下, 产生了稳定的调 Q 脉冲串, 最高单脉冲能量达到了 46 nJ, 最窄激光脉冲宽度为 70 ns, 重复频率在 140~257 kHz 可调。由于石墨烯材料具有制作简单、成本低廉、可饱和吸收光谱范围宽等优点, 因此石墨烯可饱和吸收体有望在不久的将来替代 SESAM、SWNT 等材料成为一种新型的激光锁模、调 Q 器件。

致谢 感谢北京市教委和北京工业大学的大力支持, 王璞感谢国家“千人计划”和北京市“海聚工程”项目的大力支持。

参 考 文 献

- 1 Thomas F. Carruthers, IrI N. Duling III. 10-GHz, 1. 3-ps erbium fiber laser employing soliton pulse shortening[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(13): 1927~1929
- 2 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun *et al.*. Propagation performance of adaptive phase-locked fiber laser array in turbulent atmosphere [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1442~1447
周 朴, 刘泽金, 许晓军等. 自适应锁相光纤激光阵列的湍流大气传输性能[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1442~1447
- 3 Liao Jianhong, Meng Hongyun, Wang Hongwei *et al.*. Investigation and applications of fiber laser precision cutting system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 133~136
廖健宏, 蒙红云, 王红卫等. 光纤激光精密切割系统的研制及其应用[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 133~136
- 4 Q. L. Bao, H. Zhang, Y. Wang *et al.*. Atomic layer graphene as saturable absorber for ultrafast pulsed laser[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2009, **19**(19): 3077~3083
- 5 Z. Q. Luo, M. Zhou, J. Weng *et al.*. Graphene-based passively Q-switched dual-wavelength erbium-doped fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(21): 3709~3711
- 6 K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov *et al.*. Electric

- field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, **306**(5696): 666~669
- 7 K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov *et al.*. Two-dimensional gas of massless dirac fermions in graphene [J]. *Nature*, 2005, **438**(7065): 197~200
- 8 A. C. Ferrari, J. C. Meyer, V. Scardaci *et al.*. Raman spectrum of graphene and graphene layers[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(18): 187401
- 9 D. Popa, Z. Sun, F. Torrisi *et al.*. Sub 200 fs pulse generation from a graphene mode-locked fiber laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(20): 203106
- 10 H. Zhang, D. Y. Tang, Z. M. Zhao *et al.*. Large energy mode locking of an erbium-doped fiber laser with atomic layer graphene [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(20): 17630~17635
- 11 F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan *et al.*. Graphene photonics and optoelectronics[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**: 611~622
- 12 Amos Martinez, Kazuyuki Fuse, Bo Xu *et al.*. Optical deposition of graphene and carbon nanotubes in a fiber ferrule for passive mode-locked lasing [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(22): 23054~23061
- 13 L. M. Zhao, D. Y. Tang, H. Zhang *et al.*. Dissipative soliton operation of an ytterbium-doped fiber laser mode locked with atomic multilayer graphene [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(21): 3622~3624
- 14 W. Lv, D. M. Tang, Y. B. He *et al.*. Low-temperature exfoliated graphenes: vacuum-promoted exfoliation and electrochemical energy storage[J]. *ACS Nano*, 2009, **3**(11): 3730~3736