

基于 6H-SiC 衬底外延石墨烯的被动锁模掺镱光纤激光器

刘 江¹ 魏汝省² 徐 佳¹ 徐现刚² 王 璞¹

(¹北京工业大学激光工程研究院国家产学研激光技术中心, 北京 100124)

²山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100

摘要 报道了 6H-SiC 衬底外延生长的石墨烯作为可饱和吸收体, 环形腔结构的全正色散被动锁模掺镱光纤激光器。在注入抽运功率为 250 mW 时, 得到稳定的重复频率为 1.05 MHz 的自锁模脉冲, 平均输出功率为 6 mW; 当注入抽运功率增加到 480 mW 时, 最大平均输出功率为 20 mW, 相应的最高单脉冲能量为 19 nJ, 激光脉冲宽度约为 520 ps。

关键词 激光器; 光纤激光器; 碳化硅衬底; 外延石墨烯; 被动锁模

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0802003

Passively Mode-Locked Yb-Doped Fiber Laser with Graphene Epitaxially Grown on 6H-SiC Substrates

Liu Jiang¹ Wei Rusheng² Xu Jia¹ Xu Xiangang² Wang Pu¹

(¹Institute of Laser Engineering, National Center of Laser Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

²State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

Abstract We report all-normal-dispersion passively mode-locked Yb-doped fiber laser by graphene epitaxially grown on 6H-SiC substrates in a ring cavity configuration. Stable mode-locked pulses of the fiber laser are obtained at about 250 mW incident pump power and the pulse repetition rate is 1.05 MHz; Increasing the incident pump power to 480 mW, the average output power is 20 mW, which corresponds to single pulse energy of up to 19 nJ with pulse width of about 520 ps.

Key words lasers; fiber laser; SiC substrates; epitaxial graphene; passively mode-locked

OCIS codes 140.3510; 140.4050; 160.4330

1 引 言

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^[1]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。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。人们逐渐发明了其他方法来制备石墨烯, 主要包括化学气相沉积法^[2]、化学分离法^[3]、碳化硅(SiC)衬底外延生长法^[4]等。SiC 衬底外延法与化学气相沉积法和机械剥离法相比, 生长的石墨烯具有更高的可重复性、更好的导热性和可操作性, 因此 SiC 衬底外延法

收稿日期: 2011-03-28; **收到修改稿日期**: 2011-04-18

基金项目: 北京市自然科学基金重点项目(KZ2011100050011)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)

更适合大规模生产制造性能良好、层数可控的石墨烯,此外 SiC 本身就是一种性能优越的半导体材料,因此这种制备方法在技术上占有很大的优势。利用化学气相沉积法制备的石墨烯作为可饱和吸收体实现了掺铒光纤激光器锁模^[5],采用化学分离法制备的石墨烯作为可饱和吸收体实现了低于 200 fs 的超快掺铒光纤激光器^[6]、单脉冲能量高达 7.3 nJ 的石墨烯锁模掺铒光纤激光器^[7]以及石墨烯被动调 Q 的掺铒光纤激光器^[8]。此外,尽管半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 锁模激光器的发展已经相当成熟^[9~11],但 SESAM 制作工艺复杂、生产成本低、可饱和吸收光谱范围相对较窄,而石墨烯材料具有成本低廉、可饱和吸收的工作波段较宽,覆盖了从可见光到中红外的波长范围等优势^[12,13],因此石墨烯成为最具潜力的,有望将来代替 SESAM 的锁模器件。

本文报道了在超高真空条件下加热 SiC 晶体,使 SiC 表面的 Si 原子蒸发而脱离表面,出现碳化现象,得到基于 SiC 衬底的外延石墨烯。SiC 衬底外延生长的石墨烯作为可饱和吸收体用于掺铒光纤激光器锁模,得到了稳定的重复频率为 1.05 MHz 的锁模脉冲串,激光最高平均输出功率为 20 mW,其相应的单脉冲能量为 19 nJ,脉冲宽度约为 520 ps。

2 实验装置

如图 1 所示,基于 6H-SiC 衬底外延石墨烯被动锁模的掺铒光纤激光器采用了环形腔结构。整个激光谐振腔的总长度约为 190 m,其中包括 1 m 长的掺铒单包层光纤 (Nufern SM-YSF-HI, 975 nm 吸收率为 250 dB/m) 和为了增加腔长而用的 180 m 单模无源光纤。抽运源为光纤耦合输出的单模半导体激光器,其中心波长为 974 nm,最大输出功率为 600 mW。环形器第 2 端点上的 SiC 衬底作为激光输出端,而偏振控制器则主要起到锁模优化的作用。

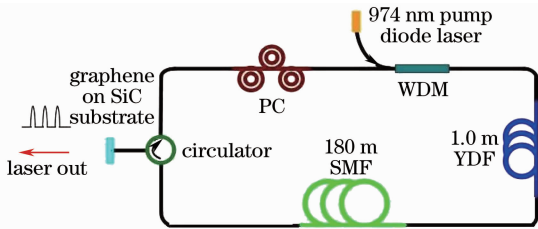


图 1 石墨烯锁模光纤激光器结构图

Fig. 1 Schematic setup of the graphene mode-locked fiber laser

实验所用的石墨烯是在超高真空条件下加热 6H-SiC 晶体,使 6H-SiC 表面的 Si 原子蒸发而脱离

表面,出现碳化现象,这样就得到了在 6H-SiC 衬底表面外延生长的石墨烯。图 2 为实验所用石墨烯可饱和吸收体的拉曼光谱,其 G 峰约位于 1580 cm^{-1} 处,而 2D 峰约位于 2710 cm^{-1} 处。由光谱仪测得该 SiC 衬底表面外延生长的石墨烯在波长 $1000\sim 2000\text{ nm}$ 的透射率约为 16%。由于 SiC 衬底的折射率较高 ($n=2.6$),可计算出被测波长的表面反射率约为 20%。考虑到单层石墨烯的吸收率约为 2.3%,因此可计算出此次实验所用的石墨烯的厚度为 18~20 层。

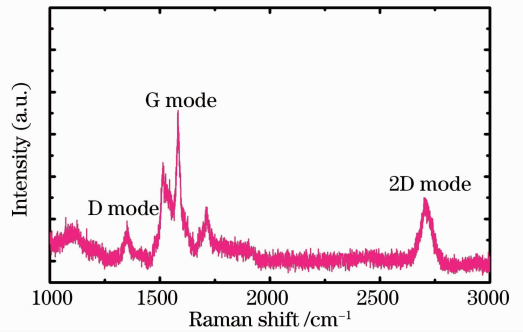


图 2 石墨烯的拉曼光谱

Fig. 2 Raman spectrum of the graphene

3 实验结果与分析

通过适当调节偏振控制器,当注入抽运功率增加到 250 mW 时,通过 4 GHz 的示波器和 5 GHz 的光电探测器观察到稳定的皮秒锁模激光脉冲串,其重复频率为 1.05 MHz,基本上与 190 m 的腔长相吻合。当抽运功率增至 480 mW 时,得到最大平均输出功率为 20 mW,相应最大单脉冲能量为 19 nJ。图 3 为微秒时间段内示波器测得的稳定的锁模脉冲串,总是单脉冲,没有出现脉冲分裂或多脉冲现象,而更进一步增加抽运功率将出现多脉冲现象,以及锁模脉冲串变得不稳定。图 4 为石墨烯锁模掺铒光纤激光输出脉冲的光谱,通过分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪测得中心波长为 1035 nm,3 dB 光谱带宽为 3 nm。图 5 为示波器和光电探测器测得的锁模光纤激光脉冲的宽度 (W_{FWHM}) 为 520 ps。

此外为了增加锁模光纤激光的重复频率,移除了激光腔内的 180 m 单模无源光纤,但是抽运功率增加到最大都没有观察到任何锁模脉冲。在全正色散被动锁模光纤激光器中,激光脉冲能量必须足够高才能获得稳定的锁模脉冲串^[14]。在本实验中当激光总腔长为 190 m 时,得到了稳定的重复频率为 1.05 MHz 的被动锁模脉冲串,由于激光的重复频

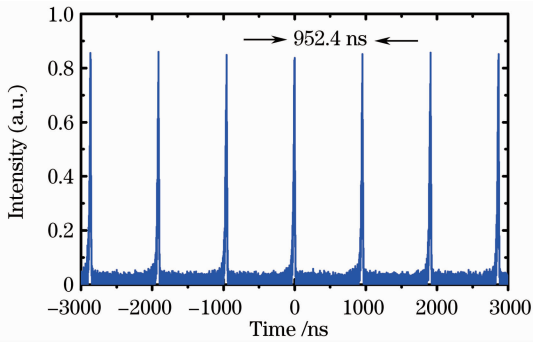


图3 石墨烯锁模光纤激光脉冲串

Fig. 3 Pulse train of the graphene mode-locked fiber laser

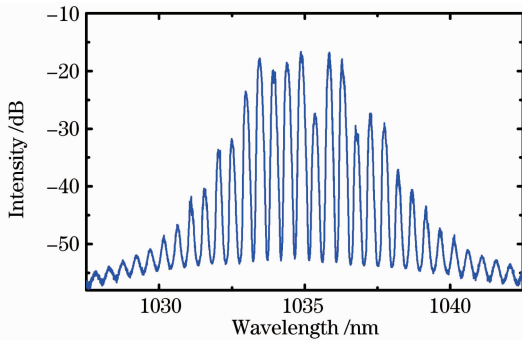


图4 石墨烯锁模光纤激光器的输出光谱

Fig. 4 Optical spectrum of the graphene mode-locked fiber laser

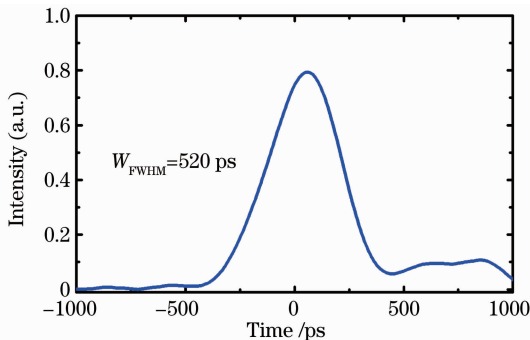


图5 石墨烯锁模光纤激光器的脉冲宽度

Fig. 5 Pulse duration of the graphene mode-locked fiber laser

率随着激光腔长的缩短而增加,重复频率增加了而相应的激光单脉冲能量也降低了^[15]。因此移除单模无源光纤之后,单脉冲能量太低以致于不能获得稳定的锁模^[14,16],所以不能观察到任何脉冲。此外,获得稳定的锁模还需要时间域与频率域的平衡。在时间域中,正色散导致的脉冲展宽效应可以被可饱和吸收体的脉冲压缩效应平衡;在频率域中,由于掺镱光纤激光器有大的增益带宽,需要用光谱滤波片来平衡非线性效应导致的光谱展宽效应^[17~19]。

因此在短腔长的全正色散掺镱光纤激光器中,若激光腔内没有光谱滤波片,获得稳定的石墨烯被动锁模比较困难。

4 结 论

研究了基于6H-SiC衬底外延石墨烯被动锁模的环形腔掺镱光纤激光器。通过超高真空条件下加热SiC晶体,使SiC表面的Si原子蒸发而脱离表面,制得基于SiC衬底表面外延生长的石墨烯作为新颖的可饱和吸收体用于全正色散光纤激光锁模,产生了稳定的重复频率为1.05 MHz的脉冲串,最高单脉冲能量达到了19 nJ,激光脉冲宽度为520 ps。由于SiC衬底外延生长的石墨烯具有导热性好、可操作性强等优点,因此SiC衬底外延石墨烯有望在不久的将来替代SESAM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 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
- 2 Keun Soo Kim, Yue Zhao, Houk Jang *et al.*. Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes [J]. *Nature*, 2009, **457**(7230): 706~710
- 3 Sasha Stankovich, Dmitriy A. Dikin, Richard D. Piner *et al.*. Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide[J]. *Carbon*, 2007, **45**(7): 1558~1565
- 4 Claire Berger, Zhimin Song, Walt A. de Heer *et al.*. Ultrathin epitaxial graphite: 2D electron gas properties and a route toward graphene-based nanoelectronics[J]. *J. Phys. Chem. B*, 2004, **108**(52): 19912~19916
- 5 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**: 3077~3083
- 6 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
- 7 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
- 8 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
- 9 Chen Shengping, Chen Hongwei, Hou Jing *et al.*. 30 W picosecond pulsed fiber laser and high power supercontinuum generation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1943~1949
- 10 陈胜平, 谌鸿伟, 侯静等. 30 W皮秒脉冲光纤激光器及高功率超连续谱的产生[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 1943~1949
- 11 Fu Jie, Pang Qingsheng, Chang Liang *et al.*. Research on cavity-dumping mode-locked laser of picosecond at 10 kHz[J]. *Acta*

- Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0314002
- 付 洁, 庞庆生, 常 亮 等. 10 kHz 腔倒空锁模皮秒激光器研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0314002
- 11 Ban Wenzheng, Wang Li, Fan Feng *et al.*. Research on mode locking characteristics of all-solid-state mode-locked laser with semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1046~1050
- 班文政, 王 丽, 范 锋 等. 全固态 SESAM 锁模激光器的锁模特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1046~1050
- 12 F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan *et al.*. Graphene photonics and optoelectronics[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**: 611~622
- 13 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
- 14 C. Hönninger, R. Paschotta, F. Morier-Genoud *et al.*. Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(1): 46~56
- 15 N. Akhmediev, Jose. M. Soto-Crespo, Ph. Grelu. Roadmap to ultra-short record high-energy pulses out of laser oscillators[J]. *Phys. Lett. A*, 2008, **372**(17): 3124~3128
- 16 R. Herda, O. G. Okhotnikov. Dispersion compensation-free fiber laser mode-locked and stabilized by high-contrast saturable absorber mirror[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(7): 893~899
- 17 Xiaolong Tian, Ming Tang, Xueping Cheng *et al.*. High-energy wave-breaking-free pulse from all fiber mode-locked laser system [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(9): 7222~7227
- 18 C.-J. Chen, P. K. A. Wai, C. R. Menyuk. Soliton fiber ring laser[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(6): 417~419
- 19 Bülend Ortaç, Marco Plötner, Jens Limpert *et al.*. Self-starting passively mode-locked chirped-pulse fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(25): 16794~16799