

基于单层石墨烯可饱和吸收的掺铒光纤激光器

黄文育¹ 冯德军¹ 姜守振² 季 伟¹ 姜明顺³ 隋青美³

¹ 山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100
² 山东师范大学物理与电子科学学院, 山东 济南 250014
³ 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061

摘要 石墨烯材料由于其优异的电学和光学性质,在被动锁模激光器中作为可饱和吸收体,得到了广泛应用。利用化学气相沉积法高温分解甲烷在铜箔上制得单层石墨烯薄膜,并测量了石墨烯的拉曼光谱。将石墨烯薄膜转移到光纤跳线的氧化锆插芯端面上做成可饱和吸收材料。实验研究了环形腔掺铒光纤脉冲激光器的输出特性,激光器由透射率为 92% 的光纤布拉格光栅作为输出腔镜,获得了峰值波长为 1556.7 nm, 3 dB 带宽为 0.068 nm, 重复频率为 6.042 MHz, 脉冲宽度为 58.8 ps 的脉冲序列, 激光阈值为 65 mW。

关键词 激光器; 光纤脉冲激光器; 石墨烯锁模; 光纤布拉格光栅; 掺铒光纤

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0202001

Erbium-Doped Fiber Laser Based on Single-Layer Graphene Saturable Absorber

Huang Wenyu¹ Feng Dejun¹ Jiang Shouzhen² Ji Wei¹ Jiang Mingshun³ Sui Qingmei³

¹ School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China
² College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China
³ School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China

Abstract As an ideal saturable absorber material, graphene has attracted widespread attentions, which can be used as saturable absorber in passive mode-locking lasers because of its perfect electronic and optical characteristics. Single-layer graphene film fabricated on the copper foil by using chemical vapor deposition method. The corresponding Raman spectroscopy is measured. The graphene film is transferred to the facet of zirconium oxide of a fiber jumper. The mode-lock Er³⁺-doped fiber laser with graphene film as saturable absorber is experimentally studied, which has a ring structure and use a fiber Bragg grating with transmissivity of 92% to select output frequency. The laser has a peak wavelength of 1556.7 nm, 3 dB bandwidth of 0.068 nm, pulse repetition rate of 6.042 MHz and threshold of 65 mW.

Key words lasers; fiber pulse laser; graphene mode-lock; fiber Bragg grating; Er³⁺-doped fiber

OCIS codes 140.3500; 140.3510; 140.3538; 140.4780; 140.4050

1 引 言

光纤脉冲激光器在光通信、医疗和生物医学方面具有诱人的应用前景。被动锁模环形腔掺铒光纤激光器由于其结构简单、起振阈值低、可以实现全光

纤结构等优点而引起人们的广泛关注^[1,2]。实现被动锁模的几种常见方法包括:腔内插入半导体可饱和吸收体(SESAMs)、单壁碳纳米管(SWCNTs)和非线性偏振旋转效应作等效可饱和吸收体等^[3,4]。

收稿日期: 2012-07-27; 收到修改稿日期: 2012-09-30

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2011FM013)和山东大学自主创新基金(2010TS014)资助课题。

作者简介: 黄文育(1985—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器和光纤光栅应用等方面的研究。

E-mail: huangwenyu06@163.com

导师简介: 冯德军(1973—),男,博士,副教授,主要从事光学全息与光信息处理、光纤传感技术、光纤光栅研制和光纤激光器等方面的研究。E-mail: dejunfeng@sdu.edu.cn(通信联系人)

其中 SESAMs 的制作和封装工艺复杂且造价高;尽管 SWCNTs 的制作相对简单且便宜,但其可饱和吸收波长范围较窄(几十纳米),损伤阈值较低会影响脉冲激光的稳定性。

石墨烯自 2004 年问世以来,以其独特的电学性质,具有能克服 SESAMs 和 SWCNTs 固有缺陷的可饱和吸收性质而获得越来越多的关注。由于泡利阻塞原理导致其独特的能量带隙结构,使石墨烯相对于 SESAMs 和 SWCNTs 具有明显的优势:低的吸收强度、大的饱和吸收调制深度、高的损坏阈值、超快的恢复时间、超宽的可饱和吸收范围(300~2500 nm),此外其价格低廉、易于制作并且与光纤的耦合性好,许多课题组将石墨烯作为可饱和吸收体材料,成功得到超短脉冲激光。2010 年, Ferrari 等^[5]报道了把石墨烯薄片放进环形腔中实现被动锁模的脉冲光纤激光器,其脉冲宽度为约 1 ps,且实现了输出光谱在 1525~1559 nm 范围内可调;2009 年, Tang 等^[6]从理论上分析了石墨烯锁模原理,并实验得到了脉冲宽度为 756 fs 的电信波段超短脉冲,并且通过改变石墨烯的厚度实现调制深度在 6.2%~66.5% 范围内可调。

本文利用化学气相沉积(CVD)法在铜箔上成功制备了石墨烯薄膜,通过范德华力吸附于光纤跳线的氧化锆插芯端面上,作为环形腔结构掺铒光纤激光器的可饱和吸收体,获得了稳定的脉冲输出。

2 石墨烯的制备与测试

本实验中石墨烯采用 CVD 法制备,甲烷作为碳源,在 50~5000 Pa 低压、900 °C 以上的高温条件下,用 25 μm^2 具有较低溶碳量的金属铜箔作为制备基底,以卷曲的方式放置到直径为 8 inch(1 inch = 0.0254 m)的 CVD 反应炉中,高温下气态碳源裂解生成碳原子吸附于铜箔基底表面,进而成核生长成“石墨烯岛”,并通过“石墨烯岛”的二维长大合并得到连续的单层石墨烯薄膜^[7,8]。制得石墨烯可饱和吸收强度为 0.68 MW/cm²。为了检验所制备的石墨烯的品质,将石墨烯材料置于拉曼光谱仪,测得其拉曼光谱如图 1 所示,波数在 2680 cm^{-1} 附近的为石墨烯的 2D 峰,1580 cm^{-1} 附近为碳的 G 峰,1350 cm^{-1} 附近为石墨烯的缺陷峰 D 峰。2D 峰强度大于 2 倍 G 峰的强度,表明制备的石墨烯为单层,D 峰的强度较小表明石墨烯的缺陷较少。

通过旋涂工艺在石墨烯表面涂上一层聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)作为支撑骨架材料,通过化学置

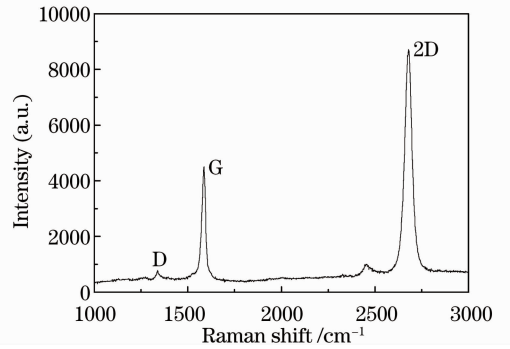


图 1 石墨烯的拉曼光谱图

Fig. 1 Raman spectrum of graphene

换反应腐蚀掉铜箔,再将石墨烯通过范德华力粘贴于光纤氧化锆插芯的端面,最后再用丙酮腐蚀掉 PMMA,室温干燥 2 h,石墨烯薄片就实现了转移。通过法兰盘连接,置于光纤接头之间的石墨烯薄膜在激光腔中作为饱和吸收体。

3 实验方案与原理

实验装置如图 2 所示。抽运源采用中心波长为 974 nm 的带尾纤输出的激光二极管(LD)(Oclaro 公司产品),通过 980 nm/1550 nm 波分复用耦合器将抽运光耦合入环形腔;采用 Nufern 公司的掺铒光纤(EDF)(980 nm 处峰值吸收大于等于 3 dB/m)作为增益介质,经过优化后长度为 10 m,其在 1530 nm 处的峰值吸收率为 6.0 dB/m;偏振无关的隔离器(ISO)更好地保证了环形腔内光的单向运转,提高输出激光的信噪比。偏振控制器(PC)用来调节激光腔的偏振态,优化激光输出;将中心波长为 1556.7 nm,反射率为 92% 的光纤布拉格光栅(FBG)通过一个三端口光纤环形器接入,如图 3 所示,FBG 作为输出腔镜起到激光选频作用(透射率 8%),环形器则进一步保证了光在腔内单向运转。环形腔的总长度大约为 34 m,腔的基频 $f = c/nL$ 为

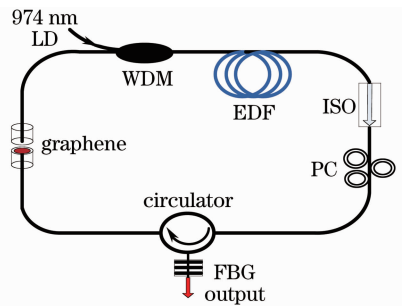


图 2 石墨烯锁模光纤激光器实验装置

Fig. 2 Experimental setup of graphene mode-locked fiber laser

6.08 MHz。在激光器输出端分别采用光谱分析仪(型号为 AQ6331,分辨率0.05 nm)、光电探测器(型号为 New focus 2053,10 MHz 带宽)结合示波器(型号为 Tektronix TDS1012)和光纤自相光仪(型号为 Femtochrome FR103-HS,分辨率小于3 fs)测量脉冲激光的光谱、脉冲序列和时域波形。

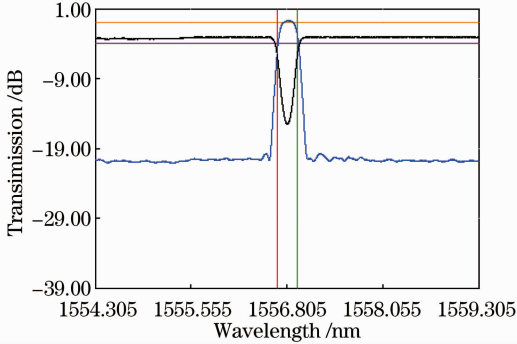


图 3 光纤布拉格光栅的透射谱

Fig. 3 Transmission spectrum of the FBG

可饱和吸收体利用其自身的响应恢复时间作为时间选通门来对激光脉冲进行时间上的整形,对于脉冲中能量较低的部分完全吸收;当脉冲中能量达到可饱和吸收体的吸收阈值时,可饱和吸收体被漂白而变得透明,使得后续部分的光得以在漂白恢复时间内无损耗地通过;当可饱和吸收体达到响应恢复时间,重新恢复吸收特性后,新的可饱和吸收过程便再次开始^[9]。

4 实验结果讨论

在抽运功率为 65 mW(经 EDF 后 1550 nm 激光的功率为 6.2 mW)时,调节 PC,激光输出经过光电探测器后输入到示波器,可以观察到稳定的脉冲。抽运阈值较之 SESAMs 和 SWCNTs 方案低很多^[10,11],主要归因于石墨烯具有较低的饱和吸收强度。在抽运功率为 107 mW(测得激光腔内石墨烯处的平均功率为 10.6 mW)时,示波器测量得到的锁模脉冲如图 4 所示,其重复频率为 6.042 MHz,与基频吻合较好。进一步增大抽运功率,脉冲序列的形状和频率保持不变。限于实验条件,所用 974 nm 的光源的最高功率为 208 mW,得到的脉冲平均功率为 1.68 mW,对应的单脉冲能量为 0.28 nJ。

由光谱分析仪得到的激光光谱如图 5 所示,激光的中心波长为 1556.7 nm,3 dB 带宽为 0.068 nm,光谱的前沿出现不太明显的突起,此突起有可能是明显的凯利旁带^[3],这可能与整个腔的色散和偏振态有关,深入原因有待进一步研究。

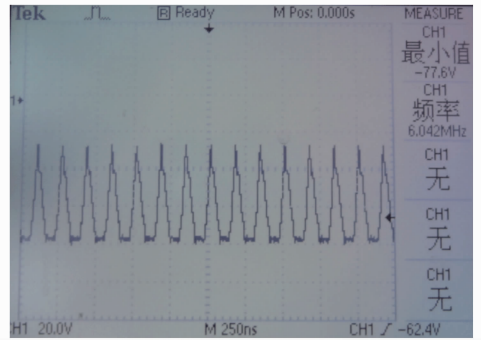


图 4 示波器测得的激光脉冲序列

Fig. 4 Order of laser pulse measured by oscilloscope

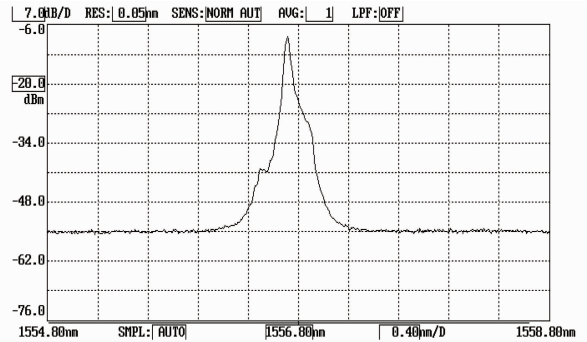


图 5 脉冲激光光谱

Fig. 5 Output spectrum of optical pulses

将输出激光接入 FR-103HS 自相关仪,测得的脉冲时域自相关轨迹波形曲线如图 6 所示,图中横坐标为时间,纵坐标为归一化脉冲强度,实线是测量得到的脉冲自相关轨迹曲线,虚线是双曲正割曲线^[12],可见输入脉冲的前后沿下降地比双曲正割曲线慢,脉冲的半峰全宽(FWHM)为 58.8 ps。

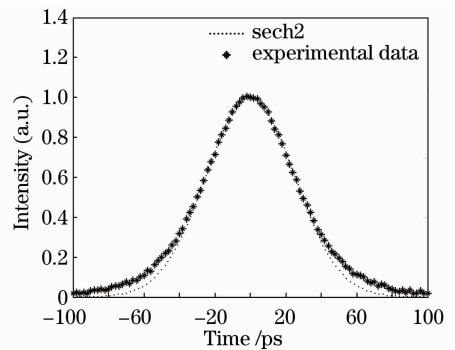


图 6 激光输出的自相关轨迹

Fig. 6 Autocorrelation trace of output pulses

5 结 论

实验研究了单层石墨烯作为可饱和吸收体的掺铒光纤环形腔锁模激光,一个透射率为 92% 的 FBG 作为激光器的输出腔镜,总腔长 34 m(理论重复频率 6.08 MHz)在抽运功率高于阈值 65 mW 时即可

获得稳定脉冲输出。输出激光波长 1556.7 nm, 3 dB谱宽度为 0.068 nm, 重复频率为 6.042 MHz, 脉冲的宽度为 58.8 ps。石墨烯作为可饱和吸收体的另一个明显优势是损伤阈值高, 是实现高功率锁模激光的一种有效方式。

参 考 文 献

- 1 Song Chuangxing, Xu Wencheng, Luo Zhichao *et al.*. Tunable mode-locked pulsed erbium-doped fiber ring laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1292~1295
宋创兴, 徐文成, 罗智超等. 可调谐锁模脉冲环形腔掺铒光纤激光器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1292~1295
- 2 Tian Zhen, Liu Shanliang, Zhang Bingyuan *et al.*. Graphene mode locked Er³⁺ doped fiber pulse laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0302004
田 振, 刘山亮, 张丙元等. 石墨烯锁模掺铒光纤脉冲激光器的实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0302004
- 3 Han Zhang, Dingyuan Tang, R. T. Knize *et al.*. Large energy soliton erbium-doped fiber laser with a graphene-polymer composite mode locker[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **95**(14): 141103
- 4 Han Zhang, Dingyuan Tang, R. T. Knize *et al.*. Graphene mode-locked, wavelength tunable, dissipative soliton fiber laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(11): 111112
- 5 Zhipei Sun, Daniel Popa, Tawfique Hasan *et al.*. A stable, wideband tunable, near transform-limited, graphene-mode-locked, ultrafast laser[J]. *Nano Res.*, 2010, **3**(9): 653~660
- 6 Qiaoliang Bao, Han Zhang, Yu Wang *et al.*. Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2009, **19**(19): 3077~3083
- 7 Ren Wencai, Gao Libo, Ma Laipeng *et al.*. Preparation graphene by chemical vapor deposition method[J]. *New Carbon Materials*, 2011, **26**(1): 71~80
任文才, 高力波, 马来鹏等. 石墨烯的化学气相沉积法制备[J]. *新型碳材料*, 2011, **26**(1): 71~80
- 8 Wang Lin, Tian Linhai, Wei Guodong *et al.*. Epitaxial growth of graphene and their applications in devices [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2011, **26**(10): 1009~1018
王 霖, 田林海, 魏国栋等. 石墨烯外延生长极器件的应用研究进展[J]. *无机材料学报*, 2011, **26**(10): 1009~1018
- 9 He Jingliang, Hao Xiaopeng, Xu Jinlong *et al.*. Ultrafast mode-locked solid-state lasers with graphene saturable absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900138
何京良, 郝霄鹏, 徐金龙等. 基于石墨烯可饱和吸收被动锁模超快全固体激光器的研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900138
- 10 S. Y. Set, H. Yaguchi, Y. Tanaka *et al.*. Ultrafast fiber pulsed lasers incorporating carbon nanotubes [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2004, **10**: 137~146
- 11 Z. Sun, A. G. Rozhin, F. Wang *et al.*. A compact, high power, ultrafast laser mode-locked by carbon nanotubes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(25): 253102
- 12 Yong Won Song, Sung Yeon Jang, Won Suk Han *et al.*. Graphene mode-lockers for fiber lasers functioned with evanescent field interaction [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(5): 051122

栏目编辑: 宋梅梅