

基于少数层石墨烯可饱和吸收的锁模光纤激光器*

冯德军^{1)†} 黄文育¹⁾ 姜守振²⁾ 季伟¹⁾ 贾东方³⁾

1) (山东大学信息科学与工程学院, 济南 250100)

2) (山东师范大学物理与电子科学学院, 济南 250014)

3) (天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

(2012年8月25日收到; 2012年11月1日收到修改稿)

本文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, 测量了石墨烯的拉曼光谱. 将石墨烯薄膜逐层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, 获得了峰值波长为 1560.1 nm, 3 dB 带宽为 0.27 nm, 重复频率为 7.69 MHz, 脉冲宽度为 58.8 ps 的锁模脉冲序列. 时间带宽积为 1.98, 表明脉冲出现了啁啾. 最后, 通过改变两个光纤活动接头之间的空气腔的长度, 激光波长实现了 4 nm 的调谐.

关键词: 光纤激光器, 石墨烯, 锁模

PACS: 42.55.We, 2.60.Fc, 81.05.Ue

DOI: 10.7498/aps.62.054202

1 引言

光纤脉冲激光器在光通信、医疗和生物医学等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等效可饱和吸收体等^[3-5]. 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 nm), 损伤阈值也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, 该石墨烯薄片通过化学方法由石墨烯微粉颗粒的悬浊液和聚乙烯醇 (PVA) 制成, 而 PVA 的存在会一定程度上影响可饱和吸收效果. 激光脉冲宽度为约 1 ps, 腔内插入了一个可调谐滤波器, 实现了输出光谱在 1525 到 1559 nm 范围内可调^[6], 重复频率为 8 MHz; 2009 年, Tang 等从理论上分析了石墨烯锁模原理, 用 1480 nm 高功率半导体激光作为抽运源, 实验得到了脉冲宽度为 756 fs 的电信波段超短脉冲, 重复频率为 8 MHz, 多层的石墨烯会加强材料的非饱和损耗, 通过改变石墨烯的厚度实现调制深度在 66.5%到 6.2%范围内可调^[7], 其生长石墨烯的衬底材料为 SiO₂/Si, 该方法制作的石墨烯材料存在结晶

* 山东省自然科学基金 (批准号: ZR2011FM013)、山东大学自主创新基金 (批准号: 2010TS014) 和光电信息技术教育重点实验室 (天津大学) 开放基金资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: dejunfeng@sdu.edu.cn

化情况, 从而影响材料的纯度.

本文利用化学气相沉积法在铜箔上成功制备了单层石墨烯薄膜^[8], 通过范德华力吸附作用, 将石墨烯薄膜逐层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, 获得了稳定的锁模激光脉冲输出. 通过改变两个光纤活动接头之间的空气腔的长度, 初步实验研究和分析了激光波长的调谐性.

2 石墨烯的制备与测试

本实验中石墨烯采用化学气相沉积制备, 甲烷作为碳源, 在 50 Pa 至 5 kPa 低压、900 °C 以上的高温条件下, 用 25 μm 具有较低溶碳量的金属铜箔作为制备基体, 以卷曲的方式放置到直径为 3 英寸的 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体表面, 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^[9,10]. 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 附近的为石墨烯的 2D 峰, 1580 附近为碳的 G 峰, 1350 附近的为石墨烯的缺陷峰 D 峰. $2\text{D}/\text{G} > 2$, 表明制备的石墨烯为单层, D 峰的强度不大表明石墨烯的缺陷较少.

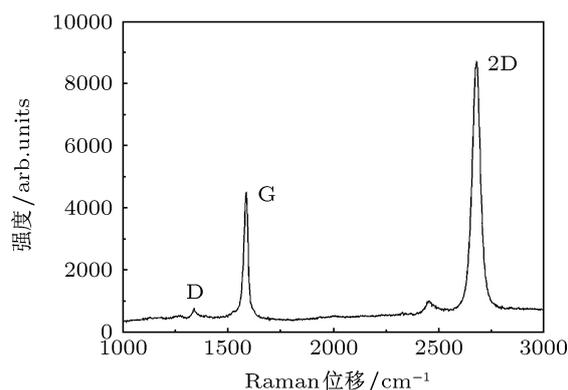


图1 石墨烯的拉曼光谱图

通过旋涂工艺在单层石墨烯表面涂上一层 PMMA 作为支撑骨架材料, 通过化学置换反应腐蚀掉铜箔, 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, 单层的石墨烯薄片就实现了转移.

单层石墨烯对光的非饱和吸收率约为 2.3%, 调制深度可达到 66.5%, 调制深度随着石墨烯的层数的增加而改变, 这样就可以通过控制其层数来改变调制深度, 有利于实现超短锁模脉冲. 因此, 我们下一步继续将已腐蚀掉铜箔的石墨烯吸附于上一层石墨烯, 再腐蚀掉 PMMA, 得到两层石墨烯. 重复以上过程, 可以实现多层石墨烯的叠合. 本文实验所用石墨烯为六层.

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 LD (Oclaro 公司), 通过 980 nm/1550 nm 波分复用耦合器将抽运光耦合入环形腔, Nufern 公司的掺铒光纤作为增益介质, 经过优化后为 10 m 长, 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) 更好的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; 通过法兰盘连接两个 FC/APC 光纤接头, 其中一个接头上制备了六层的石墨烯, 另一个接头固定于一个移动平台上, 通过螺旋测微器调节两个接头之间的空气腔的长度, 以实现腔内损耗和偏振态的改变. 石墨烯薄膜在激光腔中作为可饱和吸收体.

环形腔的总长度约为 28 m, 腔的基频 $f = c/nL$ 为 7.39 MHz. 在激光器输出端分别采用光谱分析仪 (AQ6331 optical spectrum, Res 0.05 nm)、光电探测器 (New focus 2053, 10 MHz 带宽) 结合示波器 (Tektronix TDS1012) 和光纤自相关仪 (Femtochrome FR103-HS, Res < 3 fs) 测量脉冲激光的光谱、脉冲序列和时域波形.

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^[11]. 激光输出的波长则由增益、腔内损耗和腔长等因素决定的模式竞争.

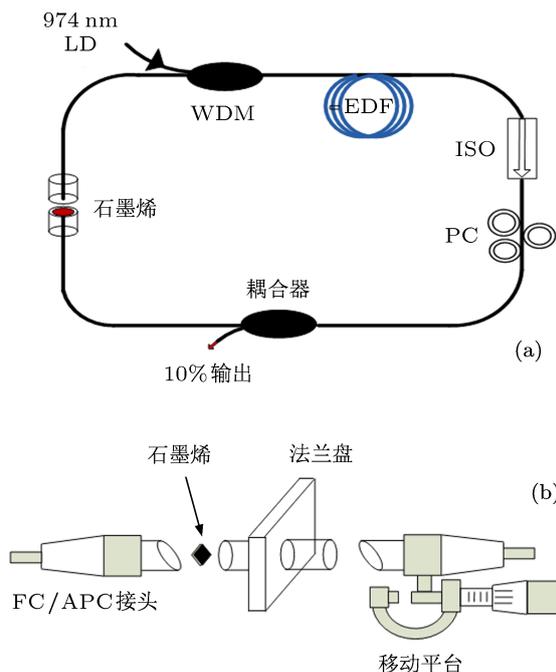


图2 (a) 石墨烯锁模光纤激光器实验图; (b) 石墨烯锁模器组装示意图

4 实验结果讨论

在抽运功率为 65 mW (正向经 EDF 后的功率为 6.2 mW@1550 nm) 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 [12,13], 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@1550 nm) 时, 示波器测量得到的锁模脉冲如图 3 所示, 其重复频率为 7.69 MHz, 与光在腔内来回一周的时间比较一致, 表明脉冲的出现是激光锁模的结果. 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 0.31 nJ.

由光谱分析仪得到的激光光谱如图 4 所示, 激光的中心波长为 1560.1 nm, 3 dB 带宽为 0.27 nm. 将输出激光直接接入 FR-103 HS 自相关仪, 测得的脉冲时域自相关轨迹波形曲线如图 5 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 [14], 可见输入脉冲的前后沿下降的比双曲正割曲线慢, 脉冲的半峰全宽 FWHM 为 58.8 ps. 时间带

宽积为 1.98, 表明锁模脉冲出现了啁啾.

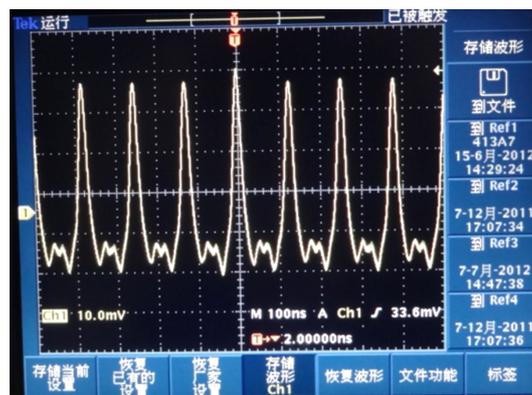


图3 示波器测得的激光脉冲序列

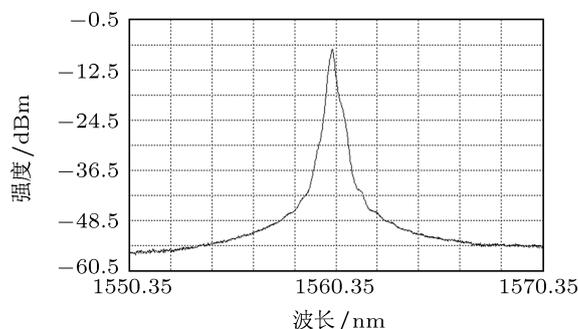


图4 脉冲激光光谱

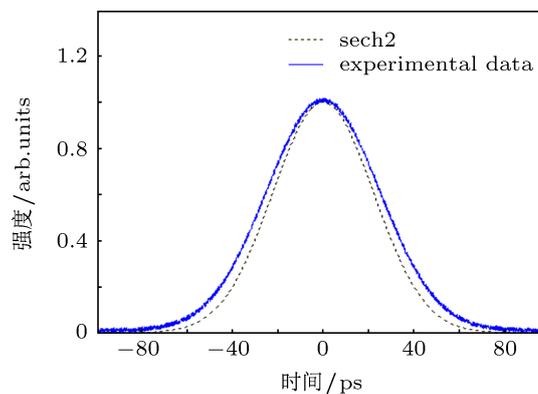


图5 激光输出的自相关轨迹

另外, 用螺旋测微器带动没有石墨烯薄膜的那个光纤接头, 我们发现增加两个 FC/APC 光纤活动接头之间的间隙 (最大调节间隙为 3 mm), 激光波长往短波方向移动, 如图 6 所示. 在调节过程中, 激光光谱变化丰富, 激光波长的连续调节范围为 4 nm (1557—1561 nm), 在此过程中, 示波器测量表明: 激光输出始终是锁模脉冲且周期几乎不变, 这也说明

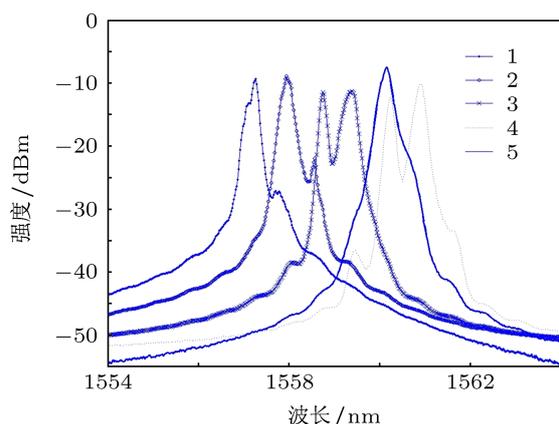


图6 激光光谱随空气腔长度的变化

石墨烯是波长不敏感的宽带超快可饱和吸收材料. 两个光纤接头之间的空气腔起到带通滤波器的作用, 也起到调节激光腔的损耗的目的. 在光谱的两侧出现明显的凯利旁带^[3], 这可能与整个腔的负色

散有关, 深入原因有待进一步研究.

5 结论

实验研究了少数层石墨烯作为可饱和吸收体的掺铒光纤环形腔锁模激光, 总腔长约为 28 m, 在抽运功率高于阈值 65 mW 时即可获得稳定锁模脉冲输出. 输出激光波长 1560.1 nm, 3 dB 谱宽度为 0.27 nm, 重复频率为 7.69 MHz, 脉冲的宽度为 58.8 ps. 通过改变两个光纤活动接头之间的空气腔的长度, 激光波长实现了 4 nm 的调谐, 在调谐过程中锁模脉冲的周期几乎不变. 本文利用化学气相沉积法高温分解甲烷得到单层石墨烯薄膜, 通过范德华力吸附作用, 将石墨烯薄膜逐层转移到光纤端面上做成可饱和吸收材料, 层数可控的石墨烯锁模器可改变其调制深度以优化脉冲输出.

- [1] Song C X, Xu W C, Luo Z C, Chen W C, Gao Y X, Liu S H 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 1292 (in Chinese) [宋创兴徐文成, 罗智超, 陈伟成, 高玉欣, 刘颂豪 2009 光学学报 **29** 1292]
- [2] Tian Z, Liu S L, Zhang B Y, Zheng H J, Sun Y X, Yan X L 2011 *Chin. J. Lasers* **38** 199 (in Chinese) [田振, 刘山亮, 张丙元, 郑宏军, 孙彦星, 闫循领 2011 中国激光 **38** 199]
- [3] Zhang H, Bao Q L, Tang D Y, Zhao L M, Knize R T, Loh K P 2010 *Appl. Phys. Lett.* **95** 141103
- [4] Zhang H, Tang D Y, Knize R T, Zhao L M, Bao Q L, Loh K P 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 111112
- [5] Gan Y, Xiang W H, Zhou X F, Zhang G Z, Zhang J, Wang Z G 2006 *Chin. J. Lasers* **33** 1021 (in Chinese) [甘雨, 向望华, 周晓芳, 张贵忠, 张喆, 王志刚 2006 中国激光 **33** 1021]
- [6] Sun Z P, Popa D, Hasan T, Torrisi F, Wang F Q, Kelleher E J R, Travers K J C, Ferrari A C 2010 *Nano. Res.* **3** 653
- [7] Bao Q L, Zhang H, Wang Y, Ni Z H, Yan Y L, Shen Z X, Loh K P, Tang D Y 2009 *Adv. Funct. Mater.* **19** 3077
- [8] Wang W R, Zhou Y X, Li T, Wang Y L, Xie X M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 038702 (in Chinese) [王文荣, 周玉修, 李铁, 王跃林, 谢晓明 2012 物理学报 **61** 038702]
- [9] Ren W C, Gao L B, Ma L P, Cheng H M 2011 *New C. Mater.* **26** 71 (in Chinese) [任文才, 高力波, 马来鹏, 成会明 2011 新型碳材料 **26** 71]
- [10] Wang L, Tian L H, Wang G D, Gao F M, Zhen J J, Yang W Y 2011 *Inorg. J. Mater.* **26** 1009 (in Chinese) [王霖, 田林海, 魏国栋, 高凤梅, 郑金桔, 杨为佑 2011 无机材料学报 **26** 1009]
- [11] He J L, Hao X P, Xu J L, Li X L, Yang Y 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0900138 (in Chinese) [何京良, 郝霄鹏, 徐金龙, 李先磊, 杨英 2011 光学学报 **31** 0900138]
- [12] Set S Y, Yaguchi H, Tanaka Y, Jablonski M 2004 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron* **10** 137
- [13] Sun Z, Rozhin A G, Wang F, Hasan T, Popa D O, Neill W, Ferrari A C 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 253102
- [14] Song Y W, Jang S Y, Han W S, Bae M K 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 051122

Few-layer graphene membrane as an ultrafast mode-locker in erbium-doped fiber laser*

Feng De-Jun^{1)†} Hang Wen-Yu¹⁾ Jiang Shou-Zhen²⁾ Ji Wei¹⁾ Jia Dong-Fang³⁾

1) (School of Information Science and Engineering, Shan Dong University, Jinan 250100, China)

2) (College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

3) (College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 25 August 2012; revised manuscript received 1 November 2012)

Abstract

Single-layer graphene film is fabricated on the copper foil by using chemical vapor deposition method, and the corresponding Raman spectrum is measured. The graphene membrane is transferred to the facet of zirconium oxide of a fiber jumper. The mode-lock Er-doped fiber laser with few-layer graphene membrane as saturable absorber is experimentally studied, which has a ring structure and uses a 10% portion of a fiber coupler as the laser output. The laser generates a pulse train at a 7.69 MHz repetition rate, with a full width at half maximum of 58.8 ps. The corresponding time-bandwidth product is 1.98, indicating that the pulses are chirped. The peak wavelength and 3 dB bandwidth of the laser are 1560.1 nm and 0.27 nm respectively. Through changing the air gap between two the fiber ends, 4 nm wavelength tuning is observed.

Keywords: fiber laser, graphene, mode locking

PACS: 42.55.We, 2.60.Fc, 81.05.Ue

DOI: 10.7498/aps.62.054202

* Project supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. ZR2011FM013), the Independent Innovation Foundation of Shandong University, China (Grant No. 2010TS014), and the Key laboratory of Opto-electronic Information Technology, Ministry of Education (Tianjin University).

† Corresponding author. E-mail: dejunfeng@sdu.edu.cn