

文章编号 1004-924X(2013)05-1097-05

基于石墨烯可饱和吸收体的掺铒光纤环形腔脉冲激光器

冯德军^{1*}, 黄文育¹, 纪鹏宇¹, 姜守振², 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:利用新型材料石墨烯作为可饱和吸收体,设计了用于光纤通信和材料加工的环形腔结构脉冲光纤激光器,实验研究了石墨烯可饱和吸收产生脉冲输出的原理以及输出脉冲激光的特性。通过激光诱导沉积法将石墨烯材料转移到光纤端面并将其置于环形激光腔结构中;采用 974 nm 半导体激光器作为抽运源,掺铒光纤作为增益介质,调节偏振控制器的角度得到了稳定的锁模输出脉冲。获得的锁模脉冲中心波长为 1 560.1 nm,重复频率为 7.89 MHz,脉冲光谱 3 dB 带宽为 0.27 nm,脉冲宽度为 14.7 ps。实验显示,由于石墨烯具有良好的可饱和吸收性能,损伤阈值比较高,有望取代单壁碳纳米管成为一种新型的激光锁模材料。

关键词:光纤脉冲激光器;石墨烯;环形腔;掺铒光纤;锁模输出

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132105.1097

Erbium-doped fiber ring cavity pulsed laser based on graphene saturable absorber

FENG De-jun^{1*}, HUANG Wen-yu¹, JI Peng-yu¹, JIANG Shou-zhen², SUI Qing-mei³

(1. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China;

2. School of Physics and Electronics Science, Shandong Normal University, Jinan 250014, China;

3. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

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

Abstract: A ring cavity fiber laser was proposed by using graphene as a saturable absorber for fiber optic communication and material processing. The principle how the grapheme could generate pulse trains and the laser output characteristics were studied experimentally. Then the laser induced deposition method was used to transfer the graphene to the fiber end face and place it in the ring laser cavity. By taking a 974 nm semiconductor laser as the pumping source and the Er³⁺-doped fiber as the gain medium, the laser generated stable pulse trains by changing the orientations of a polarizer above the

收稿日期:2012-10-24;**修订日期:**2013-01-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61205174);山东省自然科学基金资助项目(No. ZR2011FM013);山东大学自主创新基金资助项目(No. 2010TS014)

threshold pump power. The experiment shows that the center wavelength of laser is 1 560.1 nm with a full width at half maximum spectrum of 0.27 nm and the pulse repetition rate is 7.89 MHz with a pulse width of 14.7 ps. It means that the graphene is expected to replace single-walled carbon nanotubes in pulsed laser applications as a novel mode-locked material because of its good saturable absorption properties and a higher damage threshold.

Key words: fiber pulsed laser; graphene; ring cavity; Er³⁺-doped fiber; mode-locked output

1 引言

近年来,单壁碳纳米管(Single Wall Carbon Nano Tubes, SWCNTs)作为可饱和吸收体的被动锁模光纤激光器引起了人们的广泛关注^[1-4]。用 SWCNTs 实现脉冲光纤激光器的锁模具有本征恢复时间短,可饱和吸收强度大,制作容易,成本低廉等优点。SWCNTs 为直接带隙材料,其间隙依赖于纳米管的直径和手性,通过改变 SWCNTs 的直径大小可以得到一个宽带的可饱和吸收体锁模器件。但是,宽带的 SWCNTs 锁模器件也有其本征缺陷:某一直径的 SWCNTs 只能吸收特定波长的光,从而使可饱和吸收波长范围较窄(几十纳米);而不同直径的 SWCNTs 的共同存在会造成锁模器件有额外的线性损耗,增大实现锁模激光的难度。石墨烯自问世以来,因其能改善 SWCNTs 的可饱和吸收性质而获得了广泛关注。由于具有狄拉克费米子的泡利阻塞效应导致的独特能带结构,石墨烯与 SWCNTs 相比具有吸收强度大、饱和吸收调制深度大、损坏阈值高、回复时间快、可饱和吸收范围宽(300~2 500 nm)等优势。此外,石墨烯价格低廉、制作简单且与光纤的耦合性好,是用可饱和吸收体实现锁模光纤激光器的理想材料。因此,石墨烯作为可饱和吸收体的锁模光纤激光器成为了国内外关注的热点。2011年,北京大学的刘江等将在 6H-SiC 基质上外延生长石墨烯,通过环形器接入环形腔结构实现了被动锁模的光纤激光器,得到了输出激光光谱在 974 nm,重复频率为 1.05 MHz,最大输出为 600 MW 的脉冲激光^[5]。2010, Ding yuan Tang 等用石墨烯实现环形腔结构的锁模光纤激光器,得到了因孤子耗散而出现分离的脉冲激光

光谱,及 3 dB 带宽为 1.5 nm 的激光输出^[6]。

本文利用激光诱导沉积的方法使石墨烯悬浊溶液中的石墨烯通过热泳效应沉积到光纤氧化锆插芯的端面上,并将它作为可饱和吸收体接入环形腔结构掺铒光纤激光器中,得到了稳定的激光输出。

2 石墨烯的制备

本试验采用文献[7]中的方法制备石墨烯。用 Hummers 法^[8]制得氧化石墨烯:首先,将从石墨上剥离的石墨粉加入浓 H₂SO₄、K₂S₂O₈ 及 P₂O₅ 组成的溶液中,80 °C 下反应后冷却至室温,加入去离子水后过滤、自然干燥得到氧化石墨粉;然后,将石墨粉加入到浓 H₂SO₄ 中,逐步加入 KMnO₄;在 35 °C 搅拌,加入去离子水和 H₂O₂ 搅拌抽滤,用 HCl 冲洗后透析,超声处理后即可得到氧化的石墨烯溶液。取 100 mg 氧化石墨烯加入到 100 ml 去离子水中,超声处理 30 min;加入 600 mg NaBH₄ 在 80 °C 条件下还原,抽滤洗涤后再超声处理 20 min;加入 1 ml 水合肼反应 24 h,最后在 45 °C 真空干燥便可得到石墨烯。

怎样将石墨烯转移到光纤端面上是本实验的关键,实验中先将石墨烯制成石墨烯悬浊水溶液,然后采用成本低廉、操作容易的激光诱导沉积法^[9]将石墨烯直接转移到齐整的光纤端面。如图 1 所示,974 nm 的激光二极管(Laser Diode, LD)将输出为 50 mW 的激光导进光纤,光纤的末端浸入石墨烯的悬浊水溶液中,10 min 后取出光纤,在 40 °C 的温度下干燥 0.5 h。由于石墨烯悬浊水吸收光纤末端的激光而产生电泳效应^[10],石墨烯比较容易沉积在光纤端面。如图 2 所示,用光学显微镜观察沉积过石墨烯的光纤端面,能较明显

地看到光纤端面沉积的石墨烯黑色沉积物。

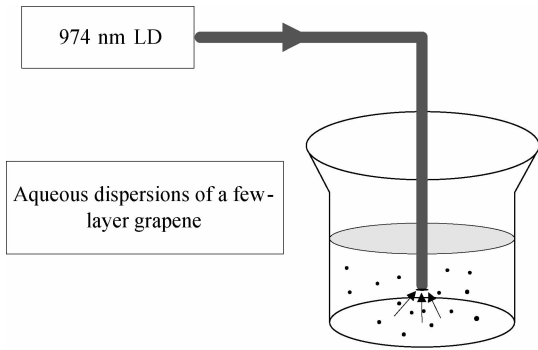


图1 激光诱导沉积转移石墨烯示意图

Fig.1 Schematic diagram for depositing graphene on fiber end face by laser radiation



图2 沉积石墨烯后的氧化锆光纤插芯端面图

Fig.2 Image of fiber end face with deposited graphene

3 实验方案与原理

实验装置如图3所示。抽运源采用中心波长为974 nm带尾纤输出的LD(Oclaro公司),通过980 nm/1 550 nm波分复用耦合器将抽运光耦合进环形腔,10 m长的掺铒光纤(Nufen公司,980 nm处峰值吸收 ≥ 3 dB/m)作为增益介质,它在1 530 nm处的峰值吸收率为6.0 dB/m;用偏振无关的隔离器(ISO)保证环形腔内光的单向运转,以抑制噪声,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;沉积在光纤端面的石墨烯通过法兰接入环形

腔中,是实验成功的关键;耦合器(1:9)10%端口作为脉冲激光输出端;环形腔的总长度大约为26 m,腔的基频($f=c/nl$)为7.95 MHz,在激光的输出端分别采用光谱分析仪(AQ6331 optical spectrum)、光电探测器(New focus 2053)配合示波器(Tektronix TDS1012)和光纤自相关仪(Femtochrome FR103-HS)测量脉冲激光的光谱、脉冲序列和时域波形。

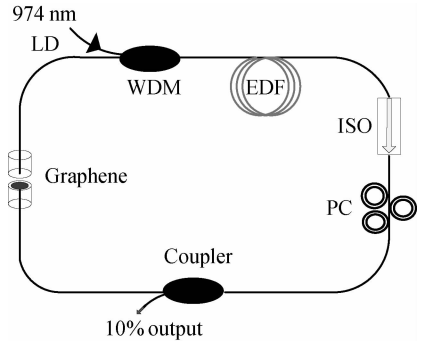


图3 石墨烯锁模光纤激光器实验图

Fig.3 Experimental setup of graphene mode-locked fiber laser

通过石墨烯的光与光波强度有关,因此脉冲的中心和两翼经过石墨烯时的透过率不同,脉冲中心透射率大,前后沿透射率小,使得峰值光强越来越强,前后沿光强越来越弱。石墨烯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。脉冲中能量较低的部分完全被吸收;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,恢复吸收特性后,新的可饱和吸收过程便再次开始^[11]。

4 实验结果讨论

由于石墨烯具有较低的吸收强度,当抽运功率为44 mW时,调节PC,激光输出经过光电探测器后输入到示波器得到脉冲序列。在泵浦功率为147 mW时,示波器测量得到稳定的脉冲序列如图4所示。脉冲峰峰间隔时间约为127 ns,与光在腔内来回一周的时间比较一致,这表明脉冲的出现是激光锁模的结果。用功率计(Agilent

81634B)测得脉冲激光的输出功率为 1.31 mW。逐步增大泵浦功率到 200 mW,观察到脉冲序列的形状和间隔时间保持不变。

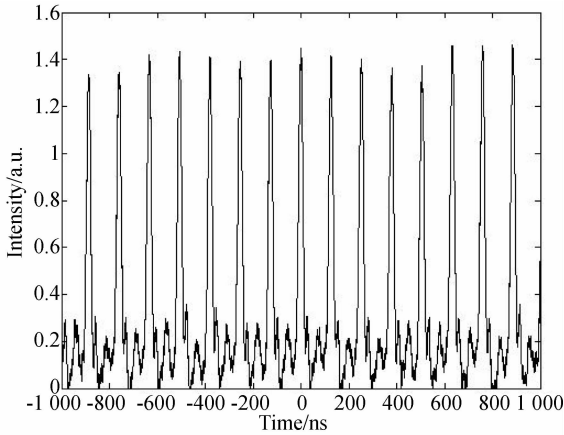


图 4 示波器测得的激光脉冲序列

Fig. 4 Laser pulse trains obtained by oscilloscope

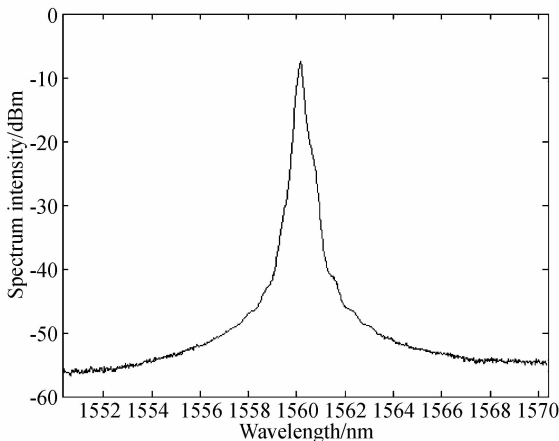


图 5 脉冲激光光谱

Fig. 5 Output spectrum of optical pulses

在泵浦功率为 147 mW 时,用光谱分析仪得到的激光输出光谱如图 5 所示。脉冲激光的中心波长为 1 560.1 nm,其 3 dB 带宽为 0.27 nm。

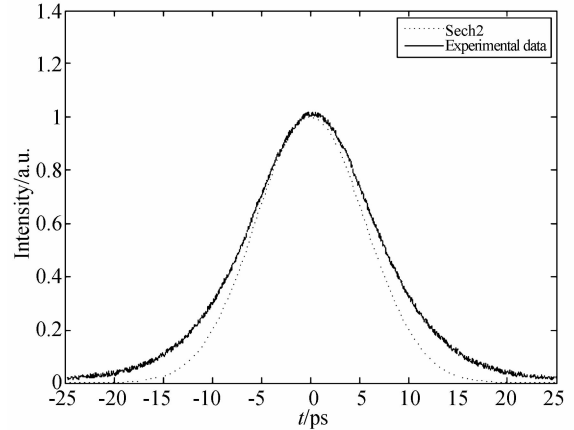


图 6 激光输出的自相关轨迹

Fig. 6 Autocorrelation trace of output 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^[12]如图 6 所示。虚线为双曲正割曲线,实线为实验测量得到的脉冲自相关轨迹曲线,脉冲的两翼不对称,脉冲的后沿偏离下降得比前沿慢,脉冲的半峰全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)为 14.7 ps,时间带宽积为 0.488。

5 结 论

本文用激光诱导沉积法将石墨烯成功转移到光纤端面,将光纤端面的石墨烯作为可饱和吸收体接入掺铒光纤环形激光腔结构得到了锁模激光。稳定的锁模脉冲激光中心波长为 1 560.1 nm,其 3 dB 带宽为 0.27 nm,脉冲重复频率为 7.89 MHz,宽度为 14.7 ps。实验结果表明,石墨烯作为可饱和吸收体能很好地实现锁模脉冲激光,而且在获得稳定脉冲输出后,增加泵浦功率输出脉冲的形状和间隔保持不变。由于石墨烯的损伤阈值比较高^[13],所以它是实现大能量可饱和吸收锁模的理想材料。

参考文献:

- [1] SET S Y, YAGUCHI H, TANAKA Y, *et al.*. Ultrafastfiber pulsed lasers incorporating carbon nanotubes [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2004, 10: 137-146.
- [2] SUN Z, ROZHIN A G, WANG F, *et al.*. A. C.

- A compact, high power, ultrafastlaser mode-locked by carbon nanotubes [1]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95: 253102-253102-3.
- [3] HASAN T, SUN ZH P, WANG F Q, *et al.*. Nanotube-polymer composites for ultrafast photonics [J]. *Advanced Materials.*, 2009,10:3874-3899.
- [4] SONG Y W, SHINJI Y, EINARSSON E, *et al.*

- All-fiber pulsed lasers passively mode locked by transferable vertically aligned carbon nanotube film [J]. *Optics Letters*, 2007, 1: 1399-1401.
- [5] LIU J, WEI R SH, XU X G, *et al.*. Mode-locked fiber laser with few-layer epitaxial graphene grown on 6H-SiC substrates [C]. *OSA/CLEO*, 2011, paper CMK3.
- [6] ZHANG H, TANG D Y, ZHAO L M, *et al.*. Vector dissipative solitons in graphene mode locked fiber lasers [J]. *Optics Communications*, 2010, 5: 3334-3338.
- [7] LI D, MULLER M B, GILJE S, *et al.*. Processable aqueous dispersions of graphene nanosheets [J]. *Nature Nanotechnology*, 2007, 2: 101-105.
- [8] HUMMERS Jr W S, OFFEMAN R E. Preparation of graphitic oxide [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 1958, 80(6): 1339-1339.
- [9] SONG Y W, JANG S Y, HAN W S, *et al.*. Graphene mode-lockers for fiber lasers functioned with evanescent field interaction [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96(5): 051122-051122-3.
- [10] LUO ZH Q, ZHOU M, WENG J, *et al.*. Graphene-based passively Q-switched dual-wavelength erbium-doped fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(21): 3709-3711.
- [11] 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): 0900138-1-5.
HE J L, HAO X P, XU J L, *et al.*. Ultrafast mode-locked solid-state lasers with graphene saturable absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900138-1-5. (in Chinese)
- [12] 刘山亮, 郑宏军. 短脉冲在色散平坦光纤中传输前后波形、相位和啁啾测量的实验研究[J]. *中国激光*, 2006, 33(2): 199-205.
LIU SH L, ZHENG H J. Experimental research on the characteristic measurement of the short pulses before and after propagating in dispersion flattened fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, 33(2): 199-205. (in Chinese)
- [13] ZHANG H, TANG D Y, KNIZE R T, *et al.*. Large energy soliton erbium-doped fiber laser with a graphene-polymer composite mode locker [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 95: 141103-141103-3.

作者简介:



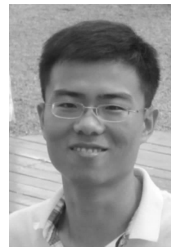
冯德军(1973—),男,副教授,硕士生导师,2001年于南开大学获得博士学位,先后在韩国庆熙大学、日本东京大学做博士后研究,现为山东大学信息学院微波研究所副所长,主要从事光纤传感,光纤激光器和放大器等光通信器件、飞秒激光微加工等方面的研究。E-mail: dejunfeng@sdu.edu.cn



黄文育(1985—),男,湖北黄冈人,硕士研究生,2010年于河海大学获得学士学位,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: huangwenyu06@163.com



姜守振(1977—),男,山东济南人,讲师,2003年于山东大学获得硕士学位,2008年于山东大学获得博士学位,主要从事功能晶体生长的研究。E-mail: jiang_sz@126.com



纪鹏宇(1987—),男,河南安阳人,硕士研究生,2011年于延边大学获得学士学位,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: jipengyu.88@163.com



隋青美(1963—),女,博士,教授,博士生导师,1983年,1987年于山东工业大学分别获得学士、硕士学位,2001年于天津大学系统工程专业获得博士学位,2004年10月~2005年10月在英国利物浦大学做访问学者,2007年5月~2007年10月在美国斯蒂文斯理工学院做访问学者,现任控制学院测控系主任,山东大学光纤传感技术工程研究中心主任,主要研究方向为检测理论及应用、光纤传感技术。E-mail: qmsui@sdu.edu.cn