

大模场双包层掺镱光子晶体光纤反射式 石墨烯被动调 Q 锁模激光器

李平雪¹ 赵自强¹ 张光举¹ 胡浩伟¹ 姚毅飞¹ 池俊杰¹ 杨 春¹
陈 宇² 赵楚军² 张 晗²

(¹ 北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124
² 湖南大学物理与微电子科学学院, 湖南 长沙 410082)

摘要 报道了基于石墨烯可饱和吸收镜的被动调 Q 锁模光纤激光器。激光器以大模场双包层掺镱光子晶体光纤为增益介质, 采用线形腔结构。在抽运功率 12 W 时, 得到了最高 115 mW 的调 Q 锁模脉冲输出。输出峰值波长 1039 nm, 光谱的半峰全宽为 6 nm。对实验结果及现象进行了详细的讨论和分析。

关键词 激光器; 光子晶体光纤; 多层石墨烯; 被动调 Q 锁模

中图分类号 TN248.1; O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0402001

Large-Mode-Area Double-Cladding Yb-Doped Photonic Crystal Fiber Q-Switched Mode-Locked Laser with Graphene-Based Saturable Absorber Mirror

Li Pingxue¹ Zhao Ziqiang¹ Zhang Guangju¹ Hu Haowei¹ Yao Yifei¹
Chi Junjie¹ Yang Chun¹ Chen Yu² Zhao Chujun² Zhang Han²

(¹ Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)
(² School of Physics and Electronics, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract A passively Q-switched mode-locked fiber laser based on graphene saturable absorber mirror is reported. A large-mode-area double-cladding Yb-doped photonic crystal fiber is adopted as a gain medium and a linear cavity is used. At pump power of 12 W, the maximum output power of 115 mW is obtained and the spectrum is centered at 1039 nm with full width of half maximum of 6 nm. The experimental results and the phenomenon are discussed and analyzed.

Key words lasers; photonic crystal fiber; multilayers-graphene; passively Q-switched mode locking

OCIS codes 060.2320; 060.3510; 060.5295; 140.3510

1 引 言

光纤锁模激光器与普通固体锁模激光器相比具有结构紧凑、脉冲稳定性好、阈值低等优点。近年来随着光纤拉制技术及光纤器件制作工艺的发展, 光纤锁模激光器获得快速发展。目前, 在光纤锁模激光器中被广泛用作饱和吸收体的是半导体可饱和吸收镜 (SESAM)^[1-2]。SESAM 用作可饱和吸收体具有可靠性好、稳定性高、容易实现激光器锁模自启

动^[3-5]等优点。但是, SESAM 存在工艺复杂、造价高、易损伤等问题^[6]。

石墨烯自 2004 年被首次制备出来后^[7], 研究发现, 其作为可饱和吸收体有着非常独特的电学性质和非线性光学饱和吸收特性。而且, 石墨烯饱和吸收体与 SESAM 相比具有生长方式简单, 制作成本低的优点。目前, 国内外课题组对以石墨烯作为可饱和吸收体的光纤锁模激光器开展了一系列研究工

收稿日期: 2013-09-24; 收到修改稿日期: 2013-11-01

作者简介: 李平雪 (1974—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子技术及激光技术等方面的研究。

E-mail: pxli@bjut.edu.cn

作。2010年, Sun等^[8]以掺铒光纤为增益介质, 石墨烯为饱和吸收体, 利用环形腔结构获得了中心波长为1560 nm, 谱宽为5.2 nm, 脉宽为500 fs的连续锁模激光输出。同年, Zhao等^[9]以掺镱光纤为增益介质, 多层石墨烯为饱和吸收体, 利用环形腔结构实现了连续锁模激光输出, 其中心波长为1069.8 nm, 脉宽为580 ps, 平均输出功率为0.37 mW, 重复频率为0.9 MHz。2011年, Liu等^[10-11]以双包层掺镱光纤作增益介质, 石墨烯为可饱和吸收体, 利用环形腔结构获得了脉冲宽度为680 ps, 重复频率为1.04 MHz, 单脉冲能量为163 nJ的调Q锁模激光输出。2012年, He等^[12]利用掺铒光纤、石墨烯以及光纤布拉格光栅搭建环形腔, 实现了波长范围在1539.4~1546 nm的可调谐连续锁模激光输出。同年, 汪光辉等^[13]采用环形腔结构, 利用石墨烯作为可饱和吸收体, 实现了平均输出功率为1.07 mW, 重复频率为3.16 MHz, 脉宽约为1.32 ps的锁模脉冲, 激光中心波长在1556.72~1558.76 nm之间可调。以上研究工作中所采用的增益光纤均是普通单模掺杂光纤。由于普通单模光纤纤芯面积小, 在高的峰值功率下会产生较强的非线性效应(如自相位调制等), 带来较大的非线性相移导致脉冲分裂, 从而影响脉冲的输出能量、峰值功率甚至输出的稳定性。

光子晶体光纤(PCF)由于其独特的导光机理、灵活多变的结构和丰富独特的优越性能, 为各种光纤器件及技术的发展开辟了新的思路。可以解决在普通光纤激光器中无法解决的难题。采用大模场面积光子晶体光纤克服了传统单模光纤由于小纤芯结构导致的高非线性限制脉冲能量进一步提高的问题(如过多的非线性会产生脉冲分裂); 而与普通的大模场双包层光纤相比, 光子晶体光纤在纤芯直径增加的同时还会保持单模输出, 在降低非线性效应的

同时还避免了锁模时出现高阶模以及模式之间的耦合影响锁模质量和稳定性的问题。所以光子晶体光纤具有的大模场面积单模特性(如通过包层微结构的特殊设计可以使光纤的模场面积达到4000 μm^2 以上仍保持单模传输特性)使激光器可以实现高功率情况下的单模运转, 这是光纤锁模激光器能够实现高能量输出的关键^[14-18]。目前, 利用掺镱光子晶体光纤作为增益介质的脉冲光纤激光器在输出功率上已经达到了数十瓦的水平。例如: Baumgart等^[16]在2012年利用大模场光子晶体光纤为增益介质, 获得了平均功率为66 W的激光输出。这些结果充分体现了大模场光子晶体光纤在实现高功率锁模方面具有独特的优势。

本文利用大模场面积双包层掺镱光子晶体光纤作为增益介质, 以多层石墨烯为可饱和吸收体, 搭建了线形腔被动调Q锁模光纤激光器, 初步实验得到了输出功率为百毫瓦级的调Q锁模脉冲, 并对实验结果及现象进行了分析和讨论。

2 实验装置

目前, 石墨烯的制备方法主要有机械剥离法、化学剥离法、表面生长法、化学合成法等。所用石墨烯由化学气相沉积(CVD)方法制备, 厚度为6~8层, 其拉曼光谱如图1(a)所示。在 1332 cm^{-1} (D峰)和 1580 cm^{-1} (G峰)出现两个峰, D峰强度几乎可以忽略, 表明石墨烯样品拥有很高的质量。采用文献^[14]类似的方法, 将石墨烯转移到银镜上, 最终获得的可饱和吸收镜(SAM)的扫描电镜(SEM)成像结果, 如图1(b)所示。从电镜获得的石墨材料表面成像可知, 采用的石墨烯材料表面均匀, 完整性良好, 不存在裂纹缺陷。

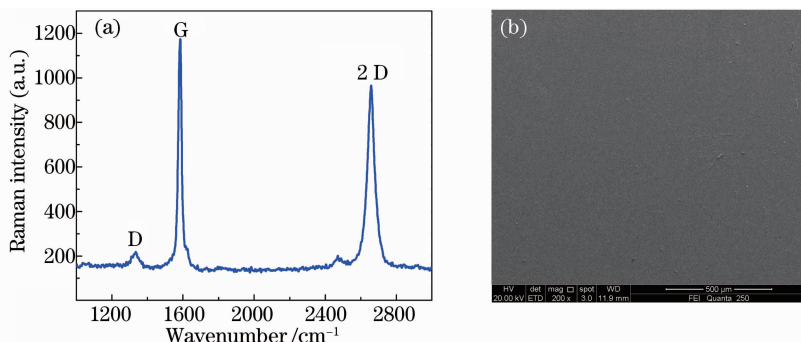


图1 (a) 石墨烯拉曼光谱图; (b) 石墨烯 SAM 扫描电镜图

Fig. 1 (a) Raman spectra of the graphene sample; (b) SEM image of the graphene SAM

实验采用输出中心波长为 976 nm 的激光二极管(LD)作为抽运源,最高输出功率为 30 W;增益介质为 2 m 长掺镱非保偏光子晶体光纤,纤芯直径为 40 μm ,内包层直径为 170 μm ,纤芯数值孔径为 0.03,包层数值孔径为 0.62,较大的数值孔径有利

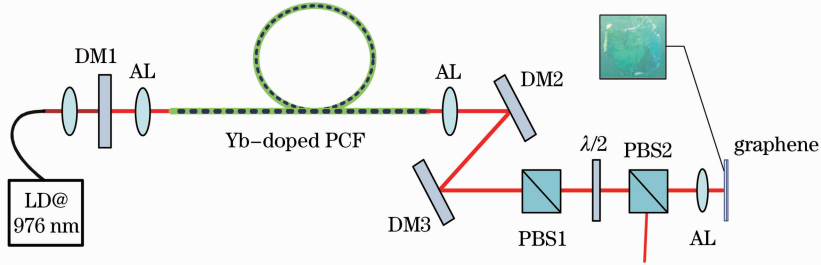


图 2 石墨烯锁模实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of the graphene mode-locking

抽运光经准直-聚焦耦合系统耦合进光子晶体光纤内包层,贴近抽运注入端光纤的二向色镜 DM1 作为线形谐振腔的前腔镜,另一端输出光经 DM2 和 DM3 转折后已将额外多余的抽运光导出腔外,保证腔内只有激光依次通过偏振分光镜 PBS1、 $\lambda/2$ 波片、偏振分光镜 PBS2,经非球面镜聚焦到作为后腔镜的反射式多层石墨烯基底上再返回原光路,从而完成一次激光振荡。这里的 PBS1 起到控制腔内激光偏振态的作用, $\lambda/2$ 波片和 PBS2 用来控制激光输出的大小,因为在旋转 $\lambda/2$ 波片的同时改变了从 PBS1 输出的光的偏振方向,这样 PBS1 与 PBS2 各自偏振方向之间的夹角会发生改变,从而控制输出光的大小。

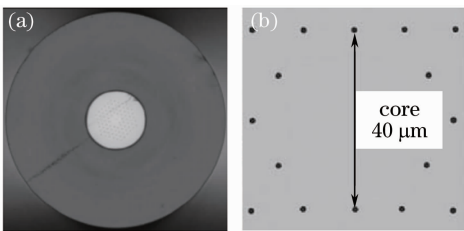


图 3 (a) 纤芯截面图; (b) 纤芯放大图

Fig. 3 (a) Sectional view of fiber core; (b) enlarged view of fiber core

为避免光纤端面损伤或污染,采用热塌陷方法使光纤两端面的空气孔区塌陷,然后对两端均以 8° 斜角抛光,以避免光纤端面的反馈形成自激振荡,影响激光器的性能。

3 实验结果与讨论

实验上通过调整石墨烯镜片的空间位置,从而优化聚焦到石墨烯镜片上的光斑大小来实现调 Q

于对抽运光的充分吸收,其对 976 nm 抽运光的吸收系数为 13 dB/m,实验装置如图 2 所示,图中 AL 为非球面镜,DM 为二色镜(对 976 nm 高透,1040 nm 高反),PBS 为偏振分光镜。图 3 为该光子晶体光纤在显微镜下的截面图和纤芯放大图。

锁模输出。由于空间光器件孔径大小的限制,使从光纤另一端输出的激光在经过 PBS1 后会有将近一半的损耗,这也是导致激光器阈值增高的原因。在抽运功率为 10 W 时,实现了 24 mW 连续光输出。抽运功率为 10.8 W 时,实现了调 Q 锁模,输出功率为 45 mW,重复频率为 892.8 Hz,用示波器(RIGOL DS4052)观测到的调 Q 锁模脉冲包络如图 4 所示。进一步增加抽运功率,调 Q 锁模脉冲序列的形状保持不变,但重复频率会有一定起伏,再轻微转动 $\lambda/2$ 波片,以平衡腔内激光循环振荡的功率密度,使激光更多地导出。在抽运功率为 12 W 时,最高输出功率为 115 mW,经光束质量分析仪测得输出光束的光束质量因子 M^2 值为 1.57,输出功率随抽运功率的变化关系曲线如图 5 所示。

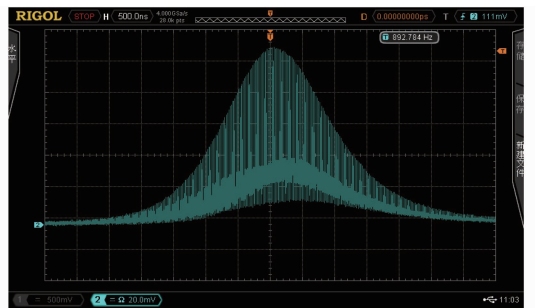


图 4 调 Q 锁模脉冲序列图

Fig. 4 Image of Q-switched mode-locked pulse sequence

从图 5 可以看出,当激光器出现调 Q 锁模状态后,随着抽运功率的增加,输出功率几乎呈线性增长趋势,斜率效率为 45.6%。但光-光转换效率却非常低,主要是由于石墨烯材料本身的损耗比较大。但当抽运功率超过 12.1 W 时,则出现不稳定调 Q 现象,如图 6 所示。此时,在涂有石墨烯的银镜表面

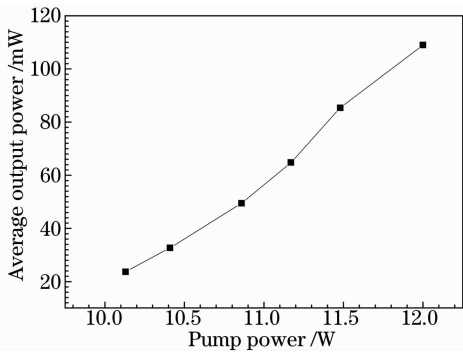


图 5 平均输出功率随抽运功率的变化关系曲线

Fig. 5 Average output power versus pump power

会有微弱的亮点闪现,随后经由示波器观察到调 Q 状态消失,且输出功率急剧下降。这主要由于此时激光器是运转在调 Q 锁模状态下,含有较高能量的巨脉冲包络很容易损坏腔内器件。所以,在此状态下,由于聚焦光斑处过高的功率密度对石墨烯材料产生了一定程度的损坏,致使激光器不能持续较长时间的调 Q 锁模状态,从而破坏了谐振腔内稳定的循环振荡,影响了激光器的正常输出性能。



图 6 不稳定调 Q 脉冲图

Fig. 6 Image of unstable Q-switched pulse

由光谱分析仪(Ocean NIRQ512)测得的激光谱线图如图 7 所示,其中心波长位于 1039 nm 处,光谱的半峰全宽约为 6 nm。

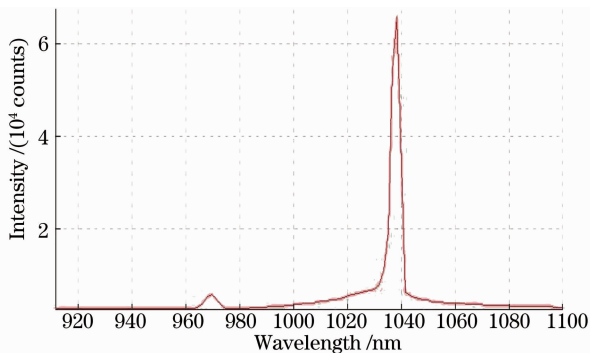


图 7 调 Q 锁模光纤激光器输出光谱谱线

Fig. 7 Output spectrum of the Q-switched mode-locking fiber laser

之所以实现了调 Q 锁模输出,而没有实现稳定的连续锁模脉冲输出,主要是由于谐振腔内的功率密度还未达到锁模阈值^[17-18]。因为在此次制备石墨烯 SAM 的过程中,石墨烯材料与银镜基底之间发生了一定的化学反应,这使得石墨烯 SAM 的表面不够均匀,且含有杂质,由此引起的吸收损耗提高了石墨烯 SAM 的锁模阈值,而且还会引起石墨烯的损伤,从而限制了腔内脉冲能量的增加,使其无法达到连续锁模所需的腔内脉冲能量^[17]。进一步的实验工作准备更换其他基底的石墨烯,例如将石墨烯材料转移到镀有高介质膜的反射镜上,或者是镀有其他金属介质膜的反射镜上(金膜全反镜),尽量保持其原有的结构。同时,还有必要进一步优化实验条件,通过更换不同焦距的非球面镜,优化聚焦到石墨烯基底上的光斑大小,调整聚焦在石墨烯上的光功率密度,从而实现稳定连续锁模。

4 结 论

尝试将多层石墨烯作为可饱和吸收镜应用于大模场双包层掺镱光子晶体光纤激光器中,实验上实现了 115 mW 稳定的调 Q 锁模脉冲输出,中心波长为 1039 nm,3 dB 带宽约为 6 nm。对实验中的现象进行了详细分析,在改进石墨烯的制备工艺后,有望实现大模场双包层光子晶体光纤的连续锁模输出。

参 考 文 献

- 1 Robert Herda, Oleg G Okhotnikov. Mode-locked Yb-doped fiber laser with external compression to 89 fs in normal dispersion fiber [J]. Appl Opt, 2008, 47(9): 1182-1186.
- 2 Yangbo Bai, Wanghua Xiang, Peng Zu, *et al.*. Tunable dual-wavelength passively mode-locked Yb-doped fiber laser using SESAM[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(11): 111405.
- 3 Mathias Moenster, Peter Glas, Günter Steinmeyer. Mode-locked Nd-doped microstructured fiber laser[J]. Opt Express, 2004, 12(19): 4523-4528.
- 4 Wang Jing, Zhang Hongming, Zhang Jun, *et al.*. Passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(2): 163-165.
王 旌, 张洪明, 张 龔, 等. 基于饱和吸收镜的被动锁模光纤激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(2):163-165.
- 5 Seung Bum Cho, Hoseong Song, Sangyoun Gee, *et al.*. Self-starting passive mode-locked ytterbium fiber laser with variable pulse width[C]. SPIE, 2010, 7580: 75802C.
- 6 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.
- 7 K S Novoselvo, A K Geim, S V Morozvo, *et al.*. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666-669.
- 8 Z Sun, T Hasan, D Popa, *et al.*. Ultrafast fiber laser mode-locked by graphene based saturable absorber [C]. San Jose: CLEO, 2010. CTuR1.

- 9 L M Zhao, D Y Tang, H Zhang, *et al.*. Dissipative soliton operation of an ytterbium-doped fiber laser mode locked fiber laser mode locked with atomic multilayer graphene[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(21): 3622–3624.
- 10 Jiang Liu, Sida Wu, Quanhong Yang, *et al.*. 163 nJ graphene mode-locked Yb-doped fiber laser[C]. Baltimore: CLEO, 2010. JWA23.
- 11 Jiang Liu, Sida Wu, Quanhong Yang, *et al.*. Mode-locked and Q-switched Yb-doped fiber lasers with graphene saturable absorber[C]. SPIE, 2011, 8192: 819244.
- 12 Xiaoying He, Zhibo Liu, D N Wang. Wavelength-tunable, passively mode-locked fiber laser based on graphene and chirped fiber Bragg grating[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(12): 2394–2396.
- 13 Wang Guanghui, Wang Zhiteng, Chen Yu, *et al.*. Passively graphene mode-locked soliton erbium-doped fiber lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0602003.
汪光辉, 王志腾, 陈宇, 等. 基于石墨烯的被动锁模掺铒光纤孤子激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0602003.
- 14 Chai Lu, Hu Minglie, Fang Xiaohui, *et al.*. Advances in femtosecond laser technologies with photonic crystal fibers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0101001.
柴路, 胡明列, 方晓慧, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0101001.
- 15 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian, *et al.*. Photonic crystal fiber femtosecond laser amplifier with millijoules and 100 fs level output[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(9): 2415–2418.
刘博文, 胡明列, 宋友建, 等. 微焦耳、百飞秒光子晶体光纤飞秒激光放大器[J]. *中国激光*, 2010, 37(9): 2415–2418.
- 16 Martin Baumgart, Caroline Lecaplain, Ammar Hideur, *et al.*. 66 W average power from a microjoule-class sub-100 fs fiber oscillator[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(10): 1640–1642.
- 17 Xuesong Li, Yanwu Zhu, Weiwei Cai, *et al.*. Transfer of large-area graphene films for high-performance transparent conductive electrodes[J]. *Nano Letter*, 2009, 9(12): 4359–4363.
- 18 Chao Feng, Danhua Liu, Jie Liu. Graphene oxide saturable absorber on golden reflective film for Tm:YAP Q-switched mode-locking laser at 2 μm [J]. *Journal of Modern Optics*, 2012, 59(21): 1825–1828.

栏目编辑: 宋梅梅