

# 基于石墨烯可饱和吸收体的被动调 Q 光纤激光器

王晓龙 桑 梅 朱 攀 陈沛佩 刘 珂 杨天新

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 报道了一种基于石墨烯可饱和吸收体的被动调 Q 光纤激光器。配制了以邻二氯苯(DCB)为溶剂,以石墨烯、聚乙烯醇(PVA)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为溶质的溶液。采用光诱导沉积法将石墨烯吸附于光纤端面,并将其作为可饱和吸收体构建到光纤激光器环形腔中。在掺铒光纤放大器(EDFA)功率为 4 mW 时即可输出稳定的调 Q 脉冲,在 1564 nm 处获得脉冲重复频率、脉宽、单脉冲能量、脉冲峰值功率随 EDFA 功率变化连续可调的稳定输出。当脉冲重复频率为 28 kHz 时获得了最大 82.4 nJ 的单脉冲能量、最大 25.1 mW 的脉冲峰值功率和最小 3  $\mu$ s 的脉冲宽度。此激光器还具有长时间稳定运转的能力。

**关键词** 激光器;被动调 Q;光学诱导沉积;石墨烯;薄膜

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0602015

## Passively Q-Switched Pulse Fiber Laser Based on Graphene Saturable Absorber

Wang Xiaolong Sang Mei Zhu Pan Chen Peipei Liu Ke Yang Tianxin

(Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology, Ministry of Education of China, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** A passively Q-switched pulse fiber laser based on graphene saturable absorber is reported. Graphene, polyvinyl alcohol (PVA) with polymethyl methacrylate (PMMA) are mixed as solute and dispersed in the 2-dichlorobenzene (DCB) solvent. The graphene film is on the end face of single mode fiber by using optically driven deposition and introduced in a ring cavity fiber laser as an optically saturable absorber. The stable Q-switched operation is initiated with erbium doped fiber amplifier (EDFA) power of 4 mW. When the central wavelength is 1564 nm, the stable pulse sequence with repetition rate, pulse duration, single pulse energy and pulse peak power continuously switchable with the change of the EDFA power is generated by the passively Q-switched pulse fiber laser. The maximum single pulse energy is 82.4 nJ and the maximum pulse peak power is 25.1 mW at the pulse repetition rate of 28 kHz. Meanwhile, the minimum pulse duration of 3  $\mu$ s is obtained. This fiber laser also has the ability of long time stable operation.

**Key words** lasers; passively Q-switched; optically driven deposition; graphene; film

**OCIS codes** 140.3500; 140.3510; 140.3540; 140.3560; 160.4236

## 1 引 言

超短脉冲激光在通信、生物医药、国防军事等各个领域都有着极为重要的应用,通过光纤激光器产生超短脉冲的方法相对于采用固体激光器的方法具有无可比拟的优势。使用光学方法获得超短脉冲的

方式很多,包括了锁模技术、调 Q 技术等。与锁模激光器产生相对低脉冲能量的短脉冲不同的是,调 Q 激光器可以提供脉宽从纳秒到微秒量级相对大的脉冲能量<sup>[1]</sup>。

调 Q 的产生可大致分为电光调 Q、声光调 Q、被

**收稿日期**: 2012-12-18; **收到修改稿日期**: 2013-01-18

**基金项目**: 国家 973 计划(2010CB327806)、国家自然科学基金面上项目(61072011)、天津市自然科学基金(10JCYBJC01200)和天津市自然科学基金重点项目(12JJCZDJC20700)资助课题。

**作者简介**: 王晓龙(1988—),男,硕士研究生,主要从事石墨烯的非线性光学特性及其在激光器被动锁模中应用等方面的研究。E-mail: wxl.tj@163.com

**导师简介**: 桑 梅(1967—),女,博士,副教授,主要从事激光技术与非线性光学领域等方面的研究。E-mail: m\_sang@tju.edu.cn(通信联系人)

动式可饱和吸收调 Q。电光调 Q 与声光调 Q 都属于主动式调 Q，需要外界控制激光谐振腔的损耗，具有体积大、成本高、紧凑性差、设计不灵活的缺点。而被动调 Q 由于其不需要额外开关电子器件因而可以更容易、更廉价地产生高能量脉冲序列。采用在激光谐振腔中插入可饱和吸收体调节腔内损耗是获得被动调 Q 激光脉冲序列一种重要的方式<sup>[2]</sup>。

近年来，随着单壁碳纳米管、石墨烯等新型纳米材料的出现，人们开始关注其在光电子领域的应用前景。这些材料以其独特的结构特性表现出优良的非线性光学特性，正在被广泛研究。尽管单壁碳纳米管具有非线性可饱和吸收、超快恢复时间等光学特点<sup>[3]</sup>，但是由于碳纳米管表面能量过高而导致其损伤阈值过低，所以基于碳纳米管的被动激光器所产生脉冲的长时间稳定性相对较差<sup>[4,5]</sup>，同时碳纳米管的光吸收性质与其管径相关<sup>[6]</sup>，所以虽然基于单壁碳纳米管可饱和吸收体的激光器自从 2003 年以来就被广泛研究<sup>[7,8]</sup>，但迄今还没有商业应用的报道。由于泡利不相容原理，石墨烯具有独一无二的能级带宽特性<sup>[9,10]</sup>。与单壁碳纳米管相比，石墨烯具有的优势包括可饱和阈值低(约为  $0.7 \text{ MW/cm}^2$ )、调制深度大(当石墨烯只有几层时;大于 60%)、损伤阈值较高、恢复时间更快(约为 200 fs)、超宽的且与波长无关的可饱和吸收范围(400~2000 nm)，并且容易构建到光纤系统中<sup>[11~17]</sup>。

本文通过改进石墨烯溶液的配方，通过光学诱导沉积法将石墨烯转移到光纤端面，并将此石墨烯可饱和吸收体接入环形光纤腔中，研究了该激光器的输出、稳定性等特征。

## 2 实验研究

### 2.1 石墨烯分散液的制备与光纤镀膜

新溶液的配制从易固化成膜、保护沉积在光纤

端面的石墨烯形态两方面来考虑。实验中使用的石墨烯分散液质量浓度为  $0.2 \text{ mg/ml}$ ；溶剂为 10 ml 邻二氯苯(DCB)，溶质为 2 mg 石墨烯、2 mg 聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、0.5 mg 聚乙烯醇(PVA)。其中 PMMA 良好的机械特性可使得石墨烯更好地成膜并固定在光纤头上；PVA 可以减小二维石墨烯片状结构被破坏的可能性，从而减小因石墨烯形态变化而导致的非线性光学特性下降<sup>[18]</sup>。将配置好的溶液置于超声器中，设置超声时间为 2 h，温度保持在  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 。超声时间不宜设置过长，以免将石墨烯片状结构破坏。

采用光学诱导沉积法将溶液中的石墨烯镀在光纤端面，镀光纤的实验装置与文献<sup>[19]</sup>相同，可调谐激光器的中心波长设置为 1560 nm，并用掺铒光纤放大器(EDFA)放大到 30 mW。将欲镀膜的光纤头浸入到事先准备好的石墨烯分散液中，与电脑相连的功率计记录了从环形器输出功率端的功率变化，功率计探测到的反射光强度随光纤端面石墨烯沉积厚度变厚而逐渐增大，当厚度达到一定值后，反射光功率趋向饱和。此时将光纤头从溶液中取出，在不改变可调谐激光器、EDFA 设置以及光路连接的基础上，将已经镀膜好的光纤头悬于  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  的干燥机上，干燥时间为 30 min，此时镀在光纤端面的石墨烯可饱和吸收体制备完成。实验测量该石墨烯薄膜的插入损耗为 1.72 dB。

采用光学显微镜、拉曼光谱仪来观察镀在光纤端面可饱和吸收体的特征。如图 1(a)所示，石墨烯不仅会在纤芯及包层处不均匀分布还会围绕着包层沉积，这与之前的报道相一致<sup>[5]</sup>。

光纤端面的拉曼分析采用美国热电公司 DXR 拉曼显微镜。图 1(b)为所测得的拉曼光谱，测试光源的中心波长是 532 nm。位于  $1380 \text{ cm}^{-1}$  处的 D 峰与位于  $1585 \text{ cm}^{-1}$  处的 G 峰强度比值  $I_D/I_G$  正比

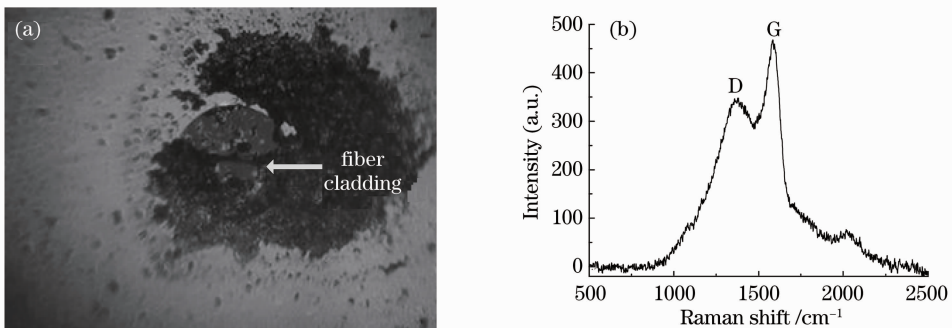


图 1 (a) 光纤端面石墨烯薄膜的显微镜图；(b) 光纤端面石墨烯薄膜的拉曼光谱

Fig. 1 (a) Microscope image of fiber end facet with graphene layer; (b) Raman spectrum of graphene layer on fiber end facet

于石墨烯形态的受损程度,与未采用 PVA 制作而得的石墨烯可饱和吸收体相比,本实验中较小的  $I_D/I_G$  比值说明光纤端面的石墨烯二维片状结构变形很小,表明 PVA 具有通过增大石墨烯层间距来减小二维石墨烯片状结构变形的作用,从而维护了石墨烯的非线性光学特性<sup>[18]</sup>。

## 2.2 光纤激光器调 Q 实验

光纤激光器如图 2 所示。EDFA 内含抽运源,

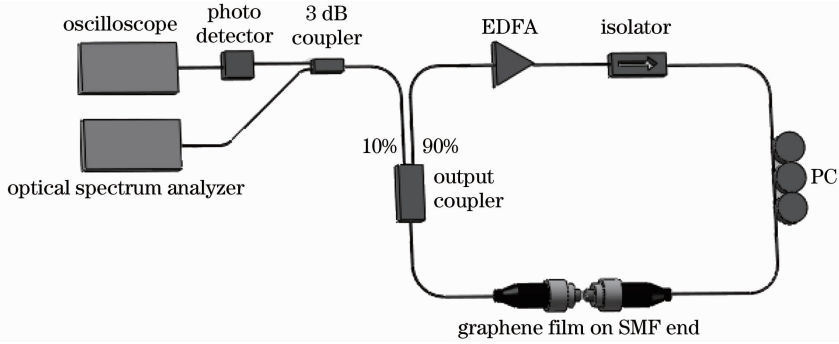


图 2 被动调 Q 光纤激光器示意图

Fig. 2 Experimental setup of the Q-switched pulse fiber laser

缓慢增加 EDFA 的输出功率,当功率为 4 mW 时示波器上即可出现调 Q 现象,这远低于基于碳纳米管或是基于半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 调 Q 激光器的抽运阈值,主要是因为石墨烯具有更低的饱和强度<sup>[20,21]</sup>。当 EDFA 输出功率为 30 mW 时,

其内部抽运源通过 980 nm/1550 nm 波分复用器耦合进入环形腔,在 EDFA 之后接入光隔离器是为防止镀膜单模光纤端面的反射光反向进入 EDFA,将已经镀好石墨烯单模光纤的一端与另一根单模光纤 (SMF) 相连接,另一端与偏振控制器相连接,输出耦合器使 90% 的光在环形腔内循环,10% 的输出光接入 TDS 500MHz 3052C 数字示波器和 Ando AQ-6315A 光谱仪进行分析。环形腔的总腔长为 22 m。

重复频率  $f$  为 17.09 kHz,激光输出频率随着 EDFA 功率的增加而线性增加。不同 EDFA 功率时示波器上的波形如图 3(a)、(b) 所示,与之相对应的光谱图如图 3(c)、(d) 所示。

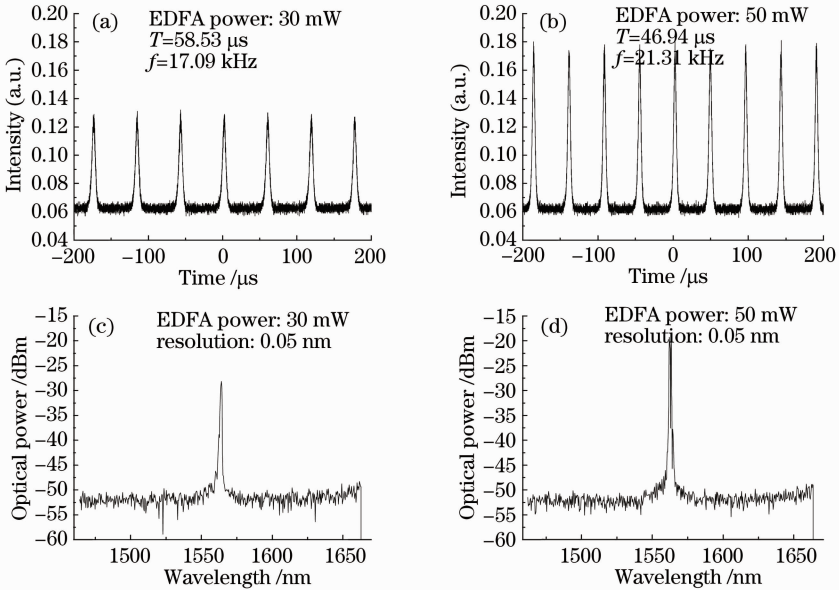


图 3 EDFA 输出功率为 (a) 30 mW 和 (b) 50 mW 时调 Q 脉冲示波器波形; (c) 30 mW 和 (d) 50 mW 时调 Q 脉冲光谱图

Fig. 3 Oscilloscope traces of the Q-switched pulse trains under (a) 30 mW and (b) 50 mW; optical spectrum analyzer traces of the Q-switched pulse trains under (c) 30 mW and (d) 50 mW

为了研究脉冲随 EDFA 功率变化的特性,需要计算脉冲宽度和对应的光谱宽度。图 4(a)、(b) 分别

为 EDFA 功率保持 20 mW 时对示波器和光谱仪上所示图形进行拟合的过程,可以得出在 20 mW 的情况

下半峰全宽(FWHM)和谱宽分别为  $5.6 \mu\text{s}$ 、 $1.13 \text{ nm}$ 。

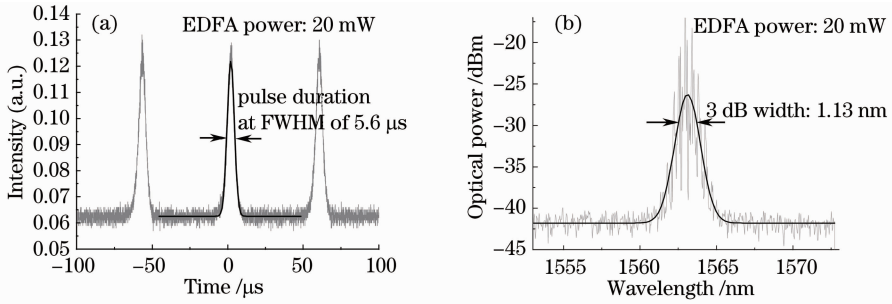


图 4 EDFA 功率为 20 mW 时对示波器和光谱仪上的图形进行拟合。(a)脉冲宽度为  $5.6 \mu\text{s}$ ;(b)光谱宽度为  $1.13 \text{ nm}$

Fig. 4 Graphics on the oscilloscope and optical spectrum analyzer are fitted when the EDFA power is 20 mW.

(a) Pulse duration is  $5.6 \mu\text{s}$ ; (b) spectrum width is  $1.13 \text{ nm}$

EDFA 功率从 20 mW 逐渐增大到 90 mW 的过程中,可计算或直接观察到脉冲重复频率从 15 kHz 至 28 kHz 连续单调增加的变化、脉冲能量从  $70.3 \text{ nJ}$  至  $82.4 \text{ nJ}$  连续单调增加的变化[图 5(a)]; 平均输出功率从  $0.15 \text{ mW}$  至  $2.08 \text{ mW}$  连续单调增

加的变化、脉冲峰值功率从  $10.9 \text{ mW}$  至  $25.1 \text{ mW}$  连续单调增加的变化[图 5(b)]; 脉冲宽度从  $5.6 \mu\text{s}$  至  $3 \mu\text{s}$  连续单调减小的变化、3 dB 带宽从  $1.13 \text{ nm}$  至  $1.35 \text{ nm}$  连续单调增加的变化[图 5(c)]。

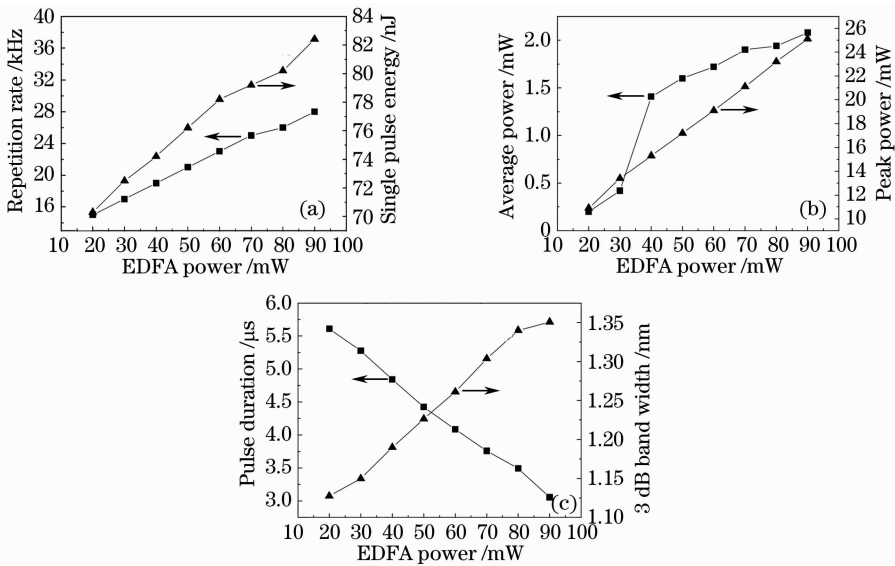


图 5 (a) 脉冲重复频率、单脉冲能量与 EDFA 功率关系;(b) 平均输出功率、峰值功率与 EDFA 功率关系;

(c) 脉冲宽度、3 dB 带宽与 EDFA 功率关系

Fig. 5 (a) Relationship among EDFA power, pulse repetition rate and single pulse energy; (b) relationship among EDFA power, average power and peak power; (c) relationship among EDFA power, pulse duration and 3 dB bandwidth

在不改变激光腔内其他器件的情况下研究改变耦合器输出比对脉冲特性的影响,测试了耦合输出比为 70:30 情况下的脉冲特征。观察到从耦合器 30% 端输出的脉宽变宽、重复频率下降、平均功率升高、单脉冲能量升高和脉冲峰值功率上升的现象。

间同时缩短,脉冲宽度变窄。同时,根据调 Q 脉冲重复频率  $f$  的相关分析<sup>[23]</sup> 可知,在光纤激光器中,随着抽运功率的提高,更多的增益提供给了可饱和吸收体,而调 Q 脉冲的产生依赖于可饱和吸收体的饱和状态,所以脉冲重复频率随着 EDFA 功率的增加而增加。

根据 Q 开关为阶跃开关函数下的简化二能级系统<sup>[22]</sup> 可知,当逐渐升高抽运功率,则抽运速率随之提高,那么反转粒子数达到的最大值也将提高,此时峰值光子数增加,调 Q 脉冲的上升时间和下降时

同时,将脉冲宽度、脉冲重复频率与相关计算方法相结合即可很好地解释为何脉冲能量、平均输出功率、脉冲峰值功率、3 dB 带宽随 EDFA 功率的改



变而呈线性变化。该分析过程也可以解释改变耦合器输出比后调 Q 脉冲变化的规律。

EDFA 的最大输出功率受到仪器本身的限制，当 EDFA 调节到最大 90 mW 时，调 Q 脉冲输出的频率为 28 kHz，此时获得了最大单脉冲能量为 82.4 nJ。当逐渐减小 EDFA 功率至 4 mW 时，示波器上调 Q 脉冲波形消失。作为对比，将镀着石墨烯的单模光纤去除后，示波器上不再出现调 Q 现象，同时光谱仪上的频谱也与之前完全不同，说明是作为可饱和吸收体的石墨烯在脉冲产生中起了作用。

### 2.3 调 Q 脉冲信号的信噪比及稳定性

为了研究调 Q 激光脉冲的稳定性，用频谱分析仪测量了 EDFA 功率变化时信噪比 (SNR) 的变化情况，当 EDFA 为 60 mW、脉冲重复频率为 23 kHz

时 SNR 为 22 dB，如图 6(a) 所示，当 EDFA 功率从 30 mW 至 70 mW 增长时，SNR 从 7 dB 至 24 dB 连续变化，如图 6(b) 所示。与锁模脉冲广泛报道的高 SNR 相比，目前石墨烯调 Q 的 SNR 大小只有为数不多的报道，已知获得最大的 SNR 为 40 dB<sup>[24]</sup>。本实验曾通过改变耦合器输出比、改变激光腔长、调节偏振控制器状态、改变光纤端面石墨烯厚度来提高 SNR，但均未见明显改善。这可能与调 Q 脉冲机制、制备的石墨烯特性相关。本实验将 EDFA 功率调至最大值 90 mW 时，该光纤激光器可连续稳定使用超过 7 h 而没有出现输出波形、输出功率、SNR 的明显抖动，长时间的实验观察证明了该输出脉冲的稳定性。

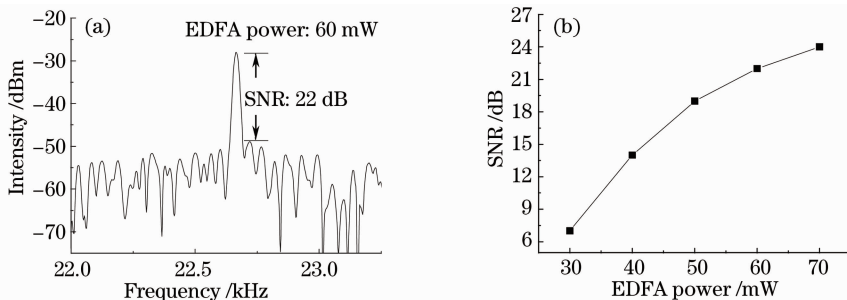


图 6 (a) 重复频率为 23 kHz 时石墨烯被动调 Q 光纤激光器的频谱图；(b) 信噪比与 EDFA 功率关系  
Fig. 6 (a) Frequency spectrum of the graphene passively Q-switched fiber laser at 23 kHz repetition rate; (b) relationship between EDFA power and SNR

## 3 结 论

制备了以 DCB 为溶剂，并以石墨烯、PVA 和 PMMA 为溶质的石墨烯溶液，通过光学诱导沉积法将石墨烯镀在光纤端面上，采用光学显微镜和拉曼显微镜对制备的石墨烯进行分析，并搭建全光纤环形激光器，获得在 EDFA 功率最低为 4 mW 时稳定的调 Q 输出波形。当脉冲重复频率为 28 kHz 时，获得最大为 82.4 nJ 的单脉冲能量、最大为 2.08 mW 的平均输出功率、最大为 25.1 mW 的脉冲峰值功率、最小为 3 μs 的脉冲宽度。研究了脉冲重复频率、脉冲能量、平均输出功率、脉冲峰值功率、3 dB 带宽、SNR 与 EDFA 功率的关系。脉冲重复频率 23 kHz 处 SNR 随着 EDFA 功率增大而线性增加及脉冲宽度随 EDFA 功率增大而线性减小。观察到改变输出耦合器比例后脉冲输出特征的变化。激光器长时间的稳定输出说明将石墨烯作为可饱和吸收体用于被动调 Q 光纤激光器是可行的。

## 参 考 文 献

- 1 H. W. Jung, S. H. Lee, B. Lee *et al.*. Graphene thickness-dependent Q-switched fiber lasers[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim. OSA, 2011. C1047
- 2 F. Wang, F. Torrisi, Z. Jiang *et al.*. Graphene passively Q-switched two-micron fiber lasers[C]. Quantum Electronics and Laser Science Conference. OSA, 2012. JW2A. 72
- 3 H. Kataura, Y. Kumazawa, Y. Maniwa *et al.*. Optical properties of single-wall carbon nanotubes[J]. *Synthetic Metals*, 1999, **103**(1-3): 2555~2558
- 4 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
- 5 A. Martinez, K. Fuse, B. 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
- 6 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
- 7 S. Y. Set, H. Yaguchi, M. Jablonski *et al.*. A noise suppressing saturable absorber at 1550 nm based on carbon nanotube technology [C]. Optical Fiber Communication Conference. OSA, 2003. FL2

- 8 S. Y. Set, H. Yaguchi, Y. Tanaka *et al.*. Ultrafast fiber pulsed lasers incorporating carbon nanotubes[J]. *Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, **10**(1): 137~146
- 9 A. K. Geim, K. S. Novoselov. The rise of graphene[J]. *Nature Materials*, 2007, **6**(3): 183~191
- 10 F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan *et al.*. Graphene photonics and optoelectronics[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(9): 611~622
- 11 Y. M. Chang, H. Kim, J. H. Lee *et al.*. Multilayered graphene efficiently formed by mechanical exfoliation for nonlinear saturable absorbers in fiber mode-locked lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(21): 211102
- 12 Liu Jiang, Wu Sida, Wang Ke *et al.*. Passively mode-locked and Q-switched Yb-doped fiber lasers with graphene-based saturable absorber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0802001  
刘江, 吴思达, 王科等. 基于石墨烯可饱和吸收体的被动锁模、被动调Q掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0802001
- 13 R. W. Newson, J. Dean, B. Schmidt *et al.*. Ultrafast carrier kinetics in exfoliated graphene and thin graphite films[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(4): 2326~2333
- 14 Q. L. Bao, H. Zhang, Y. Wang *et al.*. Atomic-layer graphene as saturable absorber for ultrafast pulsed lasers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2009, **19**(19): 3077~3083
- 15 Z. P. Sun, T. Hasan, F. Torrisi *et al.*. Graphene mode-locked ultrafast laser[J]. *ACS Nano*, 2010, **4**(2): 803~810
- 16 H. Zhang, Q. L. Bao, D. Y. Tang *et al.*. Large energy soliton erbium-doped fiber laser with a graphene-polymer composite mode locker[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(14): 141103
- 17 Zhang Cheng, Luo Zhengqian, Wang Jinzhang *et al.*. Dual-wavelength mode-locked Yb-doped fiber laser based on the interaction of graphene and fiber-taper evanescent field[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0602006  
张成, 罗正钱, 王金章等. 熔锥光纤倏逝场作用石墨烯双波长锁模掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0602006
- 18 H. Kim, J. Cho, S. Y. Jang *et al.*. Deformation-immunized optical deposition of graphene for ultrafast pulsed lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **98**(2): 021104
- 19 Zhu Pan, Sang Mei, Wang Xiaolong *et al.*. A passive mode-locking pulse fiber laser based on single-walled carbon nanotube saturable absorber[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2012, **23**(9): 1686~1690  
朱攀, 桑梅, 王晓龙等. 基于单壁碳纳米管可饱和吸收体的被动锁模光纤激光器研究[J]. *光子学报*, 2012, **23**(9): 1686~1690
- 20 J. Y. Huang, W. C. Huang, W. Z. Zhuang *et al.*. High-pulse-energy, passively Q-switched Yb-doped fiber laser with Al-Ga-In-As quantum wells as a saturable absorber[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(15): 2360~2362
- 21 D. P. Zhou, L. Wei, B. Dong *et al.*. Tunable passively Q-switched erbium-doped fiber laser with carbon nanotubes as a saturable absorber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(1): 9~11
- 22 Lan Xinju. Laser Technology[M]. Beijing: Science Press, 2005. 77~83  
蓝信钜. 激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 77~83
- 23 Ding Lei, Xu Yanjun, Kai Guiyun *et al.*. F-P cavity self-Q-switched erbium-doped fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(3): 289~291  
丁镭, 徐雁军, 开桂云等. F-P腔自调Q掺铒光纤激光器[J]. *光子学报*, 2001, **30**(3): 289~291
- 24 J. Liu, J. Xu, P. Wang. Graphene-based passively Q-switched 2  $\mu\text{m}$  thulium-doped fiber laser[J]. *Opt. Commun.*, 2012, **285**(24): 5319~5322

栏目编辑: 宋梅梅