

基于氧化石墨烯与半导体可饱和吸收镜的锁模飞秒掺铒光纤激光器

任 军¹ 吴思达² 程昭晨¹ 徐 佳¹ 杨全红² 王 璞¹

¹北京工业大学激光工程研究院 国家产学研激光技术中心, 北京 100124

²天津大学化工学院, 天津 300072

摘要 分别将氧化石墨烯可饱和吸收镜(GOSAM)与半导体可饱和吸收镜(SESAM)作为可饱和吸收体,在同一掺铒光纤激光器中均实现了全光纤结构、稳定的锁模飞秒脉冲输出。实验用抽运源为中心波长974 nm的半导体激光器,抽运1.4 m长的吸收率为7 dB/m的掺铒光纤,谐振腔总腔长约为12 m。以GOSAM作为可饱和吸收体,当抽运功率为29 mW时,激光器产生稳定的锁模脉冲输出,脉冲宽度最窄为703 fs,光谱中心波长为1557.67 nm,3 dB带宽为3.91 nm。使用调制深度为18%的SESAM作为可饱和吸收体,当抽运功率为32 mW时也可得到锁模脉冲,脉冲宽度为542 fs,光谱中心波长为1561.5 nm,3 dB带宽为5.41 nm。实验表明,新型激光锁模器件氧化石墨烯的可饱和吸收效应可与SESAM媲美,且兼具价格低廉、制备简单的优势,在实现超短脉冲运转方面具有广阔的实际应用前景。

关键词 激光器; 光纤激光器; 掺铒光纤; 半导体可饱和吸收镜; 氧化石墨烯; 锁模

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0602013

Mode-Locked Femtosecond Erbium-Doped Fiber Laser Based on Graphene Oxide versus Semiconductor Saturable Absorber Mirror

Ren Jun¹ Wu Sida² Cheng Zhaochen¹ Xu Jia¹ Yang Quanhong² Wang Pu¹

¹National Center of Laser Technology, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

²School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The all-fiber passively mode-locked erbium-doped femtosecond fiber lasers based on semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) and graphene oxide saturable absorber mirror (GOSAM) in the same cavity are demonstrated. The fiber ring laser is constituted with 1.4 m Er³⁺-doped fiber as gain medium, which is pumped by 974 nm diode laser, and with the total cavity length of 12 m. Stable mode-locked laser pulse train occurs at 29 mW incident pump power by employing GOSAM as the saturable absorber. The pulse width is measured to be 703 fs, and the center wavelength is 1557.67 nm, and 3 dB spectral bandwidth is corresponding to 3.91 nm. However, inserting SESAM with a modulation depth of 18% in the configuration mentioned above, we can obtain ultrashort pulse at 32 mW pump power, and the pulse width decreases to 542 fs. The laser center wavelength and the 3 dB spectral bandwidth are 1561.5 nm and 5.41 nm, respectively. Experimental results show that the novel mode-locking device—graphene oxide has the similar distinguished saturable absorber ability. With its advantages of low price, simple preparation, it seems to be a good candidate for saturable absorbers in achieving ultrashort pulse operation.

Key words lasers; fiber laser; erbium-doped fiber; SESAM; graphene oxide; mode-locked

OCIS codes 140.3510; 140.3500; 130.5990; 160.4330; 140.4050

收稿日期: 2015-01-28; 收到修改稿日期: 2015-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(61177048)、北京市自然科学基金重点项目(KZ2011100050011)、天津市自然科学基金(12JC-ZDJC27400)

作者简介: 任 军(1989—),女,博士研究生,主要从事超快光纤激光器、新型非线性材料等方面的研究。

E-mail: renjunemails@gmail.com

导师简介: 王 璞(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件等方面的研究。E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

1 引言

超短脉冲激光具有时域脉宽极窄、频域光谱较宽的特点,在光纤通信、光电传感、非线性光学、生物医学、工业加工等领域有着广阔的应用前景。超短脉冲的产生方法主要有主动锁模^[1]、被动锁模^[2]和主被动混合锁模^[3]。主动锁模调制脉冲能力很弱,锁模的脉宽限制在皮秒量级,且系统复杂,体积庞大,不适用于光纤激光器。非线性偏振旋转、非线性光纤环形镜及利用可饱和吸收体实现被动锁模在超快领域的应用众多,是获得皮秒或飞秒脉冲的有效方法,已经广泛应用于超短脉冲领域。

石墨烯——由单层碳原子与其相邻原子通过 sp^2 杂化方式紧密堆积成的二维蜂窝状晶格结构的新型碳质材料,自 2004 年 Novoselov 等^[4]通过机械剥离的方法从大块石墨上制备出纳米级的石墨烯薄片以来,由于其具有高比表面积、超高载流子迁移率、高机械强度、易于修饰等优点,现已在电子器件、复合材料、传感器、场发射材料等领域得到了广泛应用。近年来,碳纳米管^[5]、石墨烯等碳材料被发现可作为一种新型的可饱和吸收体广泛用于固体激光器^[6]、光纤激光器中实现被动锁模或调 Q 。2009 年, Bao 等^[7]首次以石墨烯作为可饱和吸收体实现了脉冲宽度为 756 fs, 重复频率为 1.79 MHz, 中心波长为 1565 nm 的掺铒光纤激光器的锁模运转。氧化石墨烯(GO)是采用化学还原法制备石墨烯的中间产物,其结构与石墨烯大体相同,只是在二维表面上负载一些含氧官能团,这些含氧官能团的存在增加了氧化石墨烯的亲水性。2012 年,弗罗茨瓦夫理工大学 Sobon 等^[8]分别利用氧化石墨烯与还原氧化石墨烯作为可饱和吸收体,在同一激光器中实现了锁模脉冲输出,脉宽均为 390 fs, 光谱宽度分别为 11.3 nm 和 11.2 nm, 且光谱形状几乎相同,表明氧化石墨烯与石墨烯具有类似的可饱和吸收性。由此可见,虽然含氧官能团的引入使得层面内的 π 键断裂,但氧化石墨烯仍具有超快的恢复时间、极宽的工作波长、优异的可饱和吸收特性,在光纤激光器锁模领域备受瞩目,出现了多种腔形、多种波长、多种脉冲特性的锁模激光器^[9-11]。目前,国内亦有多个课题组从事石墨烯/氧化石墨烯被动锁模光纤激光器的研究,如北京工业大学^[11]、厦门大学^[12-13]、湖南大学^[14]、山东大学^[15]等,并已取得一系列令人瞩目的研究成果。

相比其他方法,基于半导体可饱和吸收镜(SESAM)的被动锁模光纤激光器具有插入损耗低、性能稳定、抽运阈值低,且可以通过控制制备条件灵活选择其调制深度、恢复时间、饱和和通量等性能参数,因此这类激光器具有很强的可调控性^[16]。自 1992 年, SESAM 的研究者 Keller 在 Nd:YLF 激光器中实现了脉宽为 3.3 ps 的自启动锁模脉冲输出以来^[17], 国内外将 SESAM 用于光纤激光器的锁模已多有报道,并获得了纳秒至飞秒级的脉冲。2007 年,王旌等^[18]在掺铒光纤激光器中利用 SESAM 实现了脉宽最窄为 377 fs, 光谱线宽为 6.3 nm, 重复频率为几兆赫兹的锁模脉冲输出。

本文报道了全光纤结构的氧化石墨烯可饱和吸收镜(GOSAM)/SESAM 被动锁模飞秒掺铒光纤激光器。将自制的氧化石墨烯溶液沉积到宽带反射镜上,制成反射式可饱和吸收镜,并利用环形器将反射镜接入光纤环形腔,单向抽运掺铒增益光纤,在抽运功率为 29 mW 时,产生了脉宽为 703 fs 的稳定锁模脉冲输出,重复频率为 16.68 MHz, 相应的单脉冲能量为 0.238 nJ, 峰值功率达 340 W。此外,在同一谐振腔中,以 SESAM 作为可饱和吸收体也可实现超短脉冲光纤激光输出。在抽运功率为 32 mW 时,锁模脉冲宽度为 542 fs, 最大单脉冲能量 0.131 nJ, 峰值功率为 242 W。实验表明,在谐振腔内插入饱和吸收体 SESAM 或氧化石墨烯均是进行被动锁模的有效方法,且易于搭建全光纤结构激光器,选用插入损耗低的光纤器件,通过熔接工艺将各个器件相互连接,降低腔内损耗、达到相对较高的抽运吸收效率,使锁模启动阈值大大降低。由于 SESAM 具有较大的调制深度,更能有效地压缩脉冲边缘,从而缩短脉宽;而相较于 SESAM,氧化石墨烯产生稳定锁模脉冲输出的阈值要低,主要归因于氧化石墨烯具有较低的饱和吸收强度,在低功率下易于饱和,系统的非饱和损耗较低,且兼具价格低廉、制备简单的优势,在实现超短脉冲运转方面具有广阔的实际应用前景。

2 氧化石墨烯锁模光纤激光器

2.1 实验装置

实验中氧化石墨烯是采用改进 Hummers 法制备的。首先以天然鳞片石墨为原料,在强酸作用下合成氧化石墨,并经过超声振荡,使氧化石墨的片层相互分离,形成少数层的氧化石墨烯水溶液^[19]。然后将溶液沉

积到洁净的宽带全反射镜上,充分干燥后就形成了反射式氧化石墨烯可饱和吸收镜。图 1(a)是对 GOSAM 进行的拉曼光谱测试结果。从图 1(a)中可看到 2 个峰的出现,分别对应于氧化石墨烯的 D 峰(1349 cm^{-1})和 G 峰(1587 cm^{-1})。G 峰相对于石墨有所变宽且峰强减弱,同时 D 峰振动增强,是由于氧化过程中引入了大量含氧官能团,使 sp^2 向 sp^3 碳杂化方式转变,石墨的结晶性能被破坏,符合其拉曼光谱特征。拉曼谱中没有石墨烯特有的 2D 峰,则表明样品被完全氧化,GOSAM 不存在石墨烯成分。由于可饱和吸收体的调制深度直接决定被动锁模激光器的性能,为此也测量了 GOSAM 的调制深度,如图 1(b)所示。以中心波长为 1557 nm ,脉宽为 400 fs ,重复频率为 21 MHz 的 SESAM 锁模掺铒光纤激光器作为测试光源,测量了不同入射功率下 GOSAM 的反射率变化,并得到 GOSAM 的调制深度约为 5% 。GOSAM 与环形器的总损耗为 44.3% ,又测得环形器的损耗为 25% ,因此 GOSAM 的非饱和吸收损耗为 19.3% 。当入射功率为 0.4 mW 时,GOSAM 达到饱和吸收,相应的饱和光强为 35 MW/cm^2 。

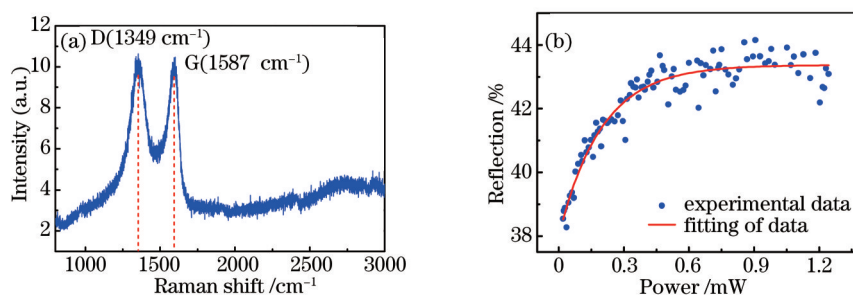


图 1 氧化石墨烯特性。(a) 氧化石墨烯可饱和吸收体拉曼光谱; (b) 氧化石墨烯可饱和吸收镜的调制深度

Fig.1 Characteristics of graphene oxide. (a) Raman spectrum of graphene oxide saturable absorber; (b) modulation depth of graphene oxide saturable absorber mirror

图 2 所示是氧化石墨烯锁模掺铒光纤激光器的实验装置,抽运源是带尾纤输出的中心波长为 974 nm 的半导体激光器,通过波分复用器(WDM)将抽运光耦合入环形腔;增益光纤是 Nufem 公司的掺铒光纤 EDFL-980-HP,其在 1550 nm 处的群速度色散(GVD)约为 $-11.7\text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,经过优化后长度为 1.4 m 。用 30% 的耦合器(OC)进行信号输出,环形器保证了光在腔内单向运转,并将氧化石墨烯可饱和吸收镜接入光纤环形腔内;偏振控制器(PC)用来调节腔内的偏振态,优化激光输出;之后加入长约 4 m 的群速度色散为 $18\text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ SM28 单模光纤(SMF)进行色散补偿。激光器总的腔长约为 12 m ,总净色散约为 -0.25 ps^2 。

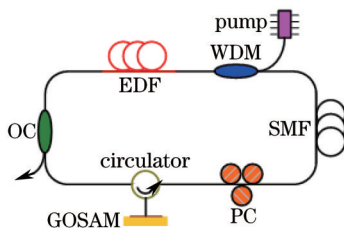


图 2 氧化石墨烯锁模掺铒光纤激光器装置图

Fig.2 Schematic setup of graphene oxide mode-locked erbium-doped fiber laser

2.2 实验结果

抽运功率为 29 mW 时,调节偏振控制器,可得到稳定的锁模脉冲输出。图 3 是输出激光经过 25 GHz 高速光电探测器后输入到 25 GHz 实时示波器(Agilent DSO-X92504A)后观测到的脉冲串,脉冲间隔基本相等,幅度变化不大,输出波形十分稳定,其重复频率为 16.82 MHz ,与基频吻合较好。图 4 为通过自相关仪(Femtochrome, FR-103XL)测量的脉冲自相关迹,自相关信号的半峰全宽(FWHM)为 1.08 ps 。假设为双曲正割型脉冲,拟合后得到的脉宽约为 703 fs 。此时激光器输出的平均功率为 4.0 mW ,相应的最大单脉冲能量为 0.238 nJ ,峰值功率 340 W 。进一步增加抽运功率,由于光纤内的非线性效应增强,会导致脉冲分裂现象。

图 5 所示是分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪(YOKOGAWA, AQ6370B,分辨率为 0.02 nm)测量的激光光谱,其中心波长为 1557.67 nm , 3 dB 带宽为 3.91 nm 。由于整个激光器运转在净负色散状态,因此光谱形状上出现了明显的 Kelly 边带。为了测量其稳定性,采用带宽为 7.5 GHz 的频谱分析仪(Agilent N9000A)测量锁模

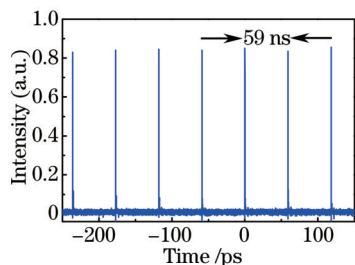


图3 氧化石墨烯锁模光纤激光器的脉冲串

Fig.3 Pulse train of graphene oxide mode-locked erbium-doped fiber laser

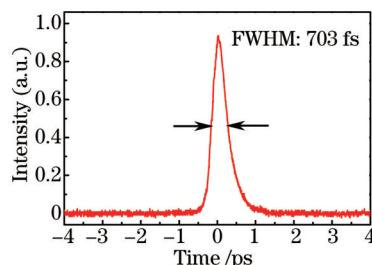


图4 氧化石墨烯锁模光纤激光器自相关迹

Fig.4 Autocorrelation trace of graphene oxide mode-locked erbium-doped fiber laser

激光脉冲在基频 16.82 MHz 时的频谱图。由图 6 可看出信噪比大于 52 dB, 表明该锁模激光器具有较高的稳定性。且系统可在测试的 2 h 内保持稳定运转。

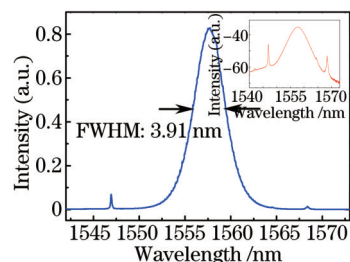


图5 氧化石墨烯锁模光纤激光器输出光谱

Fig.5 Optical spectrum of graphene oxide mode-locked erbium-doped fiber laser

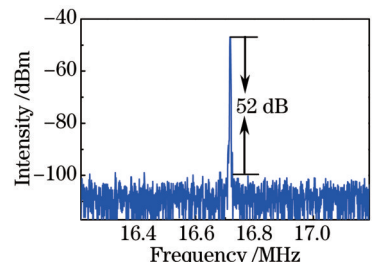


图6 氧化石墨烯锁模光纤激光器信噪比

Fig.6 Signal-to-noise ratio of graphene oxide mode-locked erbium-doped fiber laser

3 SESAM 锁模光纤激光器

在同一谐振腔中,又以调制深度为 18%,恢复时间为 2 ps 的 SESAM(BATOP)作为可饱和吸收体,也得到了飞秒脉冲激光输出。为了防止 SESAM 吸收光子过程中产生的热量,导致其温度的变化,将 SESAM 固定在金属底座上。

抽运功率为 32 mW 时,锁模激光器自启动。由于 SESAM 具有相对较高的非饱和损耗,激光器的锁模阈值提高约 3 mW。锁模激光脉冲的光谱曲线如图 7 所示,其中心波长为 1561.5 nm,3 dB 光谱带宽为 5.41 nm。图 8 是测量的脉冲自相关迹,拟合后其脉宽为 542 fs,相应的单脉冲能量为 0.131 nJ,峰值功率为 242 W。若继续增加抽运功率,同样会出现脉冲分裂现象。

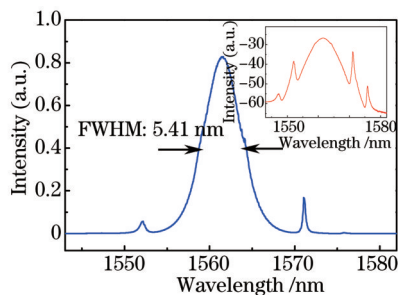


图7 SESAM 锁模光纤激光器输出光谱

Fig.7 Optical spectrum of SESAM mode-locked erbium-doped fiber laser

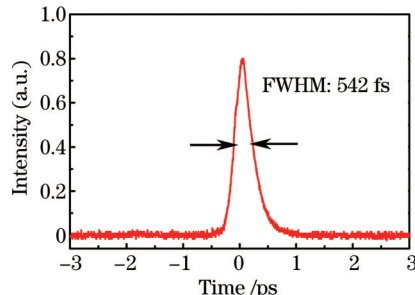


图8 SESAM 锁模光纤激光器自相关迹

Fig.8 Autocorrelation trace of SESAM mode-locked erbium-doped fiber laser

4 结 论

SESAM 与 GOSAM 具有稳定性能高、插入损耗小、能够自启动锁模等优点,但受限于材料的非线性光学

响应不同,锁模的激光脉冲宽度会产生很大差异。实验表明,由于SESAM的调制深度明显高于氧化石墨烯,较大的调制深度能更有效地压缩脉冲边缘,从而缩短脉宽。而氧化石墨烯相较于SESAM,产生稳定锁模脉冲输出的阈值要低,主要归因于氧化石墨烯具有较低的饱和吸收强度,在低功率下易于饱和,系统的非饱和损耗较低。从制备工艺来看,通过复杂的SESAM吸收层的设计,可得到不同调制深度、吸收谱带、吸收系数的半导体可饱和吸收镜。随着激光器带宽的要求越来越高,对低损耗的宽带可饱和吸收镜的要求也越来越迫切。氧化石墨烯由于其本身所特有的零带隙狄拉克锥结构,具有很宽的光谱响应范围,使之成为备受瞩目的新型可饱和吸收材料,同时具有亲水性与可控性、价格低廉、制备简单、产率高等优势,虽然现在石墨烯/氧化石墨烯锁模激光器大部分还只是处在实验室研究阶段,没有实现实用化及大规模生产,相信随着技术的日益成熟,氧化石墨烯在不久的将来有可能替代SESAM成为锁模激光器中的主要锁模器件。

参 考 文 献

- 1 J J O'Neil, J N Kutz, B Sandstede, *et al.*. Theory and simulation of dynamics and stability of actively modelocked lasers[J]. IEEE J Quantum Electron, 2002, 38(10): 1412-1419.
- 2 N H Seong, D Y Kim. A new figure-eight fiber laser based on a dispersion-imbalanced nonlinear optical loop mirror with lumped dispersive elements[J]. IEEE Photonics Technol Lett, 2002, 14 (4): 459-462.
- 3 R P Davey, R P Fleming, K Smith, *et al.*. Mode-locked erbium fibre laser with wavelength selection by means of fibre Bragg grating reflector[J]. Electron Lett, 1991, 27(22): 2087-2088.
- 4 K S Novoselov, A K Geim, S V Morozov, *et al.*. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666-669.
- 5 Wang Yonggang, Qu Zunshi, Liu Jie, *et al.*. High power picosecond lasers mode locked with carbon based absorbers[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 070200.
王勇刚, 曲遵世, 刘 杰, 等. 碳基吸收体被动锁模大功率皮秒激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 070200.
- 6 Y G Wang, Z S Qu, J Liu, *et al.*. High efficient sandwich-structured wall paper graphene oxide absorber for Q-switched Nd:GdVO₄ laser[J]. Nanotechnology, 2011, 22, 455203.
- 7 Q L Bao, H Zhang, Y Wang, *et al.*. Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers[J]. Adv Funct Mater, 2009, 19(19): 3077-3083.
- 8 G Sobon, J Sotor, J Jagiello, *et al.*. Graphene oxide vs. reduced graphene oxide as saturable absorbers for Er-doped passively mode-locked fiber laser[J]. Opt Express, 2012, 20(17): 19463-19473.
- 9 Liu Jiang, Wei Rusheng, Xu Jia, *et al.*. Passively mode-locked Yb-doped fiber laser with graphene epitaxially grown on 6H-SiC substrates[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0802003.
刘 江, 魏汝省, 徐 佳, 等. 基于6H-SiC衬底外延石墨烯的被动锁模掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0802003.
- 10 Cao Yi, Liu Jia, Liu Jiang, *et al.*. Passively Q-switched Nd:YAG microchip laser based on graphene[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39 (2):0202009.
曹 懿, 刘 佳, 刘 江, 等. 基于石墨烯被动调Q Nd:YAG 晶体微片激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0202009.
- 11 Xu Jia, Liu Jiang, Wu Sida, *et al.*. Graphene oxide mode-locked femtosecond erbium-doped fiber lasers[J]. Opt Express, 2012, 20 (14): 15474-15480.
- 12 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.
- 13 Cheng Huihui, Luo Zhengqian, Ye Chenchun, *et al.*. Graphene-based erbium-doped fiber soliton laser with passive mode locking and tunable harmonic orders[J]. Journal of Optoelectronics & Laser, 2012, 23(6): 1035-1038.
程辉辉, 罗正钱, 叶陈春, 等. 石墨烯被动锁模谐波阶数可调的掺铒光纤孤子激光器[J]. 光电子与激光, 2012, 23(6): 1035-1038.
- 14 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.
- 15 Feng Dejun, Hang Wenyu, Jiang Shouzheng, *et al.*. Few-layer graphene membrane as an ultrafast mode-locker in erbium-doped

- fiber laser[J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(5): 054202.
- 冯德军, 黄文育, 姜守振, 等. 基于少数层石墨烯可饱和吸收的锁模光纤激光器[J]. *物理学报*, 2013, 62(5): 054202.
- 16 M Guina, N Xiang, S Suomalainen, *et al.*. Mode-locked fiber laser stabilized by semiconductor saturable absorber modulated with the residual pump[C]. *IEEE*, 2002, 2: 403-404.
- 17 U Keller, D A B Miller, G D Boyd, *et al.*. Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers: an antiresonant semiconductor Fabry - Perot saturable absorber[J]. *Opt Lett*, 1992, 17(7): 505-507.
- 18 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 鋈, 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.
- 19 Yang Yonggang, Chen Chengmeng, Wen Yuefang, *et al.*. Oxidized graphene and graphene based polymer composites[J]. *New Carbon Materials*, 2008, 23(3): 0193-0200.
- 杨永岗, 陈成猛, 温月芳, 等. 氧化石墨烯及其聚合物的复合[J]. *新型炭材料*, 2008, 23(3): 0193-0200.

栏目编辑: 宋梅梅