

被动锁模的传统孤子、耗散孤子掺铒光纤激光器

徐 佳¹ 吴思达² 刘 江¹ 孙若愚¹ 谭方舟¹ 杨全红² 王 璞¹

(¹北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124; ²天津大学化工学院, 天津 300072)

摘要 报道了基于氧化石墨烯被动锁模的超短脉冲掺铒光纤激光器。通过设计激光腔的结构, 可使激光器分别运转在全负色散区以及正色散区。当激光器运行在全负色散区时, 可得到重复频率为 61 MHz 的传统孤子脉冲输出, 脉冲宽度为 500 fs, 光谱宽度为 5.7 nm, 最大输出功率为 6 mW, 单脉冲能量为 0.1 nJ。当激光器运行在正色散区时, 可得到重复频率为 11.5 MHz 的耗散孤子脉冲输出, 脉冲宽度为 143 ps, 光谱宽度为 2.4 nm, 最大输出功率为 21 mW, 单脉冲能量为 1.8 nJ。

关键词 激光器; 掺铒光纤激光器; 被动锁模; 氧化石墨烯

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0702003

Passively Mode-Locked Traditional Soliton, Dissipative Soliton Er-Doped Fiber Lasers

Xu Jia¹ Wu Sida² Liu Jiang¹ Sun Ruoyu¹ Tan Fangzhou¹ Yang Quanhong² Wang Pu¹

(¹*Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*
²*School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract We demonstrate the ultrafast graphene oxide mode-locked Er-doped fiber lasers. The lasers can operate in all anomalous dispersion regime and normal dispersion regime respectively through the cavity design. When the laser operates in the all anomalous dispersion regime, the traditional soliton pulse trains at repetition rate of 61 MHz are generated. The measured pulse width is 500 fs, spectral width is 5.7 nm, and the maximum output power is 6 mW, corresponding to single pulse energy of 0.1 nJ. In the normal dispersion regime, dissipative soliton pulse trains at repetition rate of 11.5 MHz are generated. The pulse width is 143 ps, spectral width is 2.4 nm, and the maximum output power is 21 mW, corresponding to single pulse energy of 1.8 nJ.

Key words lasers; erbium-doped fiber laser; passive mode-locking; graphene oxide

OCIS codes 140.3460; 140.3500; 140.4050; 160.4330

1 引 言

近年来, 位于通信窗口以及人眼安全波段的 1.5 μm 超短脉冲掺铒光纤 (EDF) 激光器被广泛应用于通信传感、生物医疗以及基础科学研究等多个领域中, 如光学相干断层扫描仪、光学频率梳和超连续谱的产生。实现超短脉冲输出的主要技术手段是被动锁模技术。自从 1992 年 Keller 等^[1] 发明了半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 以来, 这种半导体锁模器件逐渐发展为工艺成熟的商业化产品, 也成为了

被动锁模激光器中的关键元器件。但 SESAM 制备工艺复杂、价格昂贵并且作用波长范围较窄, 通常只有几十纳米。因此人们迫切希望研制出新型的宽带可饱和吸收材料。2003 年, Set 等^[2] 首次报道了基于单层碳纳米管 (SWCNT) 的被动锁模光纤激光器, 使得碳基材料的可饱和吸收性质引起了人们的关注。2009 年 Bao 等^[3] 和 Hasan 等^[4] 又分别报道了基于石墨烯被动锁模的光纤激光器。这种新型碳基材料——石墨烯——由于具有超快的恢复时间、

收稿日期: 2013-01-06; 收到修改稿日期: 2013-03-04

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)

作者简介: 徐 佳(1988—), 女, 博士研究生, 主要从事超短脉冲掺铒光纤激光器、光纤放大器等方面的研究。

E-mail: xujia@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 王璞(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤激光器、光纤放大器等方面的研究。

E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

极宽的作用波长和很强的可饱和吸收特性被认为是一种极具发展前景的可饱和吸收体,石墨烯被动锁模光纤激光器的研究也备受瞩目。目前,国内从事这方面研究的课题组主要有北京工业大学^[5-7]、厦门大学^[8]、湖南大学^[9]、山东大学^[10]以及聊城大学^[11]等单位。在 1.0 μm 波段,刘江等^[7]利用 SiC 外延生长法制备的石墨烯材料作为可饱和吸收体,实现 520 ps 的掺镱锁模光纤激光器;在 1.5 μm 波段,田振等^[11]以石墨烯-聚乙烯醇(PVA)薄膜作为可饱和吸收体,实现了重复频率为 8.7 MHz,脉冲宽度为 10.29 ps 的锁模脉冲输出;汪光辉等^[9]通过光沉积法制备了透射式的可饱和吸收体,并且得到了输出脉冲宽度为 1.32 ps 的石墨烯锁模掺铒光纤激光器,输出功率为 1.07 mW;黄文育等^[10]利用化学气相沉积法在铜箔上制得单层石墨烯,并将石墨烯薄膜转移到光纤跳线端面上制成可饱和吸收体,采用环形腔实现了 58.8 ps 的锁模掺铒光纤激光器。

2012 年,北京工业大学课题组采用氧化石墨烯作为可饱和吸收体,设计研发了基于氧化石墨烯的锁模掺铒^[12-14]、掺钇^[15]光纤激光器。氧化石墨烯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,只是在二维基面上连有一些含氧官能团,如羧基、羟基、羰基和环氧官能团等,其中羟基和环氧官能团主要位于石墨烯的基面上,羰基和羧基则处于石墨烯的边缘处^[16]。这些含氧官能团使得氧化石墨烯不需要表面活性剂就能在水中很好地分散。良好的亲水性使得氧化石墨烯在制备和应用方面具有更高的操作性和灵活性。虽然含氧官能团的引入使得层面内的 π 键断裂,失去了良好的导电性,但大量研究表明氧化石墨烯依然具有可与石墨烯相媲美的极快的恢复时间和极强的可饱和吸收特性^[17-18]。此外,氧化石墨烯可以通过化学合成的方法从天然石墨材料中大量制得,制作成本低廉,且制备工艺比石墨烯更为简单、成品率更高。这些优势使得氧化石墨烯材料在脉冲激光器领域有着重大的研究意义和应用前景。

本文报道了全光纤结构的氧化石墨烯被动锁模掺铒光纤激光器。通过设计激光腔的结构,采用不同色散参数的光纤,可使锁模激光器运转在不同的色散区域,分别得到了脉冲宽度为 500 fs,重复频率为 61 MHz 的传统孤子脉冲输出以及脉冲宽度为 143 ps,重复频率为 11.5 MHz 的耗散孤子脉冲输出。本实验表明这种基于氧化石墨烯材料的可饱和吸收镜可以工作在不同的色散区域,有望成为代替

传统 SESAM 的新型锁模器件。

2 传统孤子掺铒光纤激光器

图 1 为氧化石墨烯锁模传统孤子掺铒光纤激光器装置图。激光器采用了环形腔结构,用中心波长 974 nm 的半导体激光器进行纤芯抽运,该抽运源的最大输出功率为 500 mW。激光器的增益介质是长约 50 cm 的负色散掺铒光纤,该光纤在 980 nm 处的吸收率约为 43 dB/m,在 1550 nm 处的群速度色散(GVD)约为 17 ps·nm⁻¹·km⁻¹。实验中用到的单模光纤(Corning SM28 型)的 GVD 约为 18 ps·nm⁻¹·km⁻¹。激光器总腔长约为 3.3 m,腔内总色散约为 -0.077 ps²。腔内激光通过分束比为 30/70 的耦合器的 30%端输出。环形器用于保证腔内激光单向传输,同时引入锁模器件——氧化石墨烯可饱和吸收镜(GOSAM)。文献[12]中详细报道了这种基于氧化石墨烯材料的可饱和吸收镜的制备方法和特征参数。

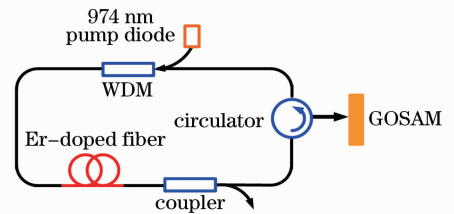


图 1 氧化石墨烯锁模传统孤子光纤激光器装置图
Fig. 1 Schematic setup of graphene oxide mode-locked traditional soliton fiber laser

当抽运功率为 86 mW 时,激光器可以得到稳定的锁模脉冲输出。图 2 为继续增加抽运功率至 187 mW 时,通过 25 GHz 的光电探头和 25 GHz 实时示波器(Agilent DSO-X92504A)测得的锁模脉冲串,其重复频率为 61 MHz。从示波器中可以观察到输出脉

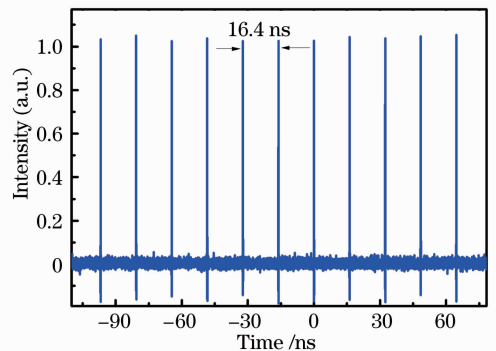


图 2 氧化石墨烯锁模传统孤子光纤激光器脉冲串
Fig. 2 Pulse train of graphene oxide mode-locked traditional soliton fiber laser

冲是稳定的单脉冲,没有出现脉冲分裂现象。图 3 为在 187 mW 抽运功率下,通过自相关仪测得的脉冲自相关迹,其半峰全宽为 770 fs,在双曲正割函数拟合下,锁模脉冲的脉冲宽度约为 500 fs。图 4 是抽运功率分别为 86、105、187 mW 时脉冲的光谱图。光谱宽度随着抽运功率的增加而变宽,同时在光谱的中心波长处出现明显的直流分量,这是由于锁模器件的调制深度较小(约为 2.6%)导致的。图 4 中蓝色曲线为 187 mW 抽运功率下的脉冲光谱,两边的 Kelly 边带表明了输出脉冲为传统孤子。Kelly 边带的不对称则是由调制不稳定性以及腔内双折射产生的不同的光谱滤波效应导致的^[19]。通过分辨率为 0.02 nm 的光谱仪测得其中心波长为 1557.1 nm,若不考虑直流分量,其 3 dB 光谱带宽为 5.7 nm,此时相应的时间带宽积约为 0.353,接近傅里叶转换极限。激光器输出功率为 6 mW,单脉冲能量为 0.1 nJ。进一步增加功率将会出现由光纤非线性效应导致的脉冲分裂现象。如图 5 所示,用带宽 7.5 GHz 的频谱分析仪测得锁模激光脉冲在基频 61 MHz 时的信噪比为 58 dB。

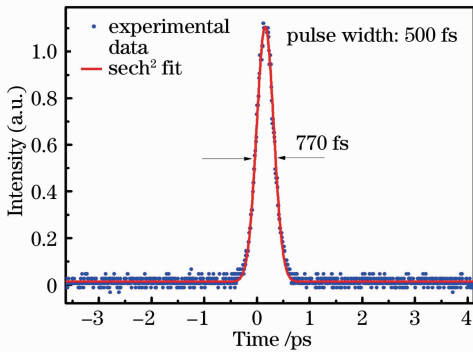


图 3 氧化石墨烯锁模传统孤子光纤激光器脉冲宽度
Fig. 3 Pulse width of graphene oxide mode-locked traditional soliton fiber laser

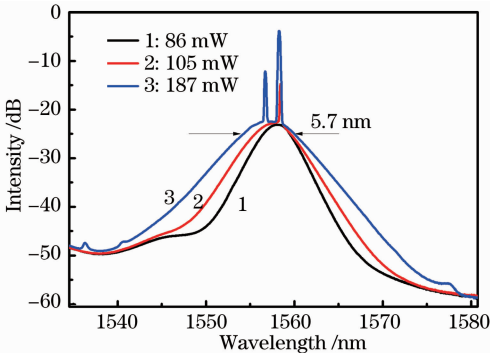


图 4 氧化石墨烯锁模传统孤子光纤激光器输出光谱
Fig. 4 Optical spectra of graphene oxide mode-locked traditional soliton fiber laser

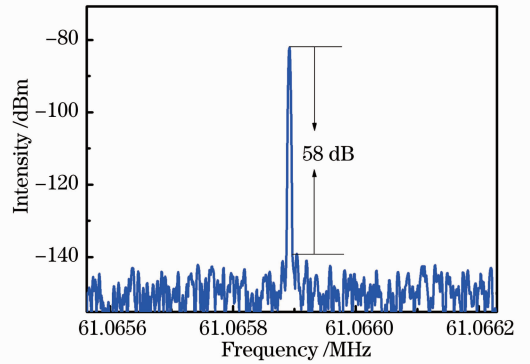


图 5 氧化石墨烯锁模传统孤子光纤激光器信噪比
Fig. 5 Signal-to-noise ratio of graphene oxide mode-locked traditional soliton fiber laser

3 耗散孤子掺铒光纤激光器

图 6 为氧化石墨烯锁模耗散孤子光纤激光器装置图。该激光器与全负色散腔氧化石墨烯锁模光纤激光器的结构很相似,且使用了同一个 GOSAM,其主要区别在于这里用了正色散的掺铒光纤以及色散补偿光纤来补偿激光腔内的色散,使其工作在正色散区。其中,掺铒光纤在 980 nm 的吸收率约为 7 dB/m,在 1550 nm 处的 GVD 约为 $-11.7 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,长度为 3.5 m。色散补偿光纤(长飞 DCF)在 1550 nm 的 GVD 约为 $-141 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,长度为 3 m。激光器总腔长约为 17.4 m,腔内总色散约为 0.35 ps^2 。腔内激光脉冲通过分束比为 50/50 的耦合器输出。

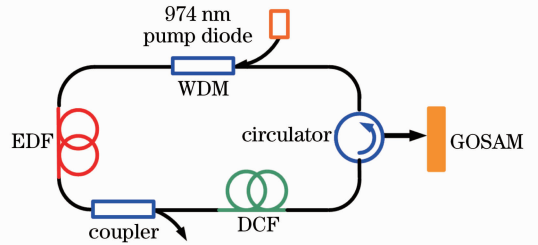


图 6 氧化石墨烯锁模耗散孤子光纤激光器装置图
Fig. 6 Schematic setup of graphene oxide mode-locked dissipative soliton fiber laser

当抽运功率为 207 mW 时,锁模激光器自启动。由于色散补偿光纤与单模光纤的熔接损耗较大(约为 50%),因而激光腔具有较大的损耗,激光器锁模阈值较高。图 7 为在最大抽运功率 500 mW 时测得的重叠频率为 11.5 MHz 的锁模脉冲串。图 8 为示波器测得的单个脉冲波形,其半峰全宽为 202 ps,通过高斯函数拟合得到的脉冲宽度约为 143 ps。图 9 是输出脉冲的光谱图,其中心波长为 1556.2 nm,3 dB 光谱带宽为 2.4 nm。光谱两侧有陡沿结构,表明激

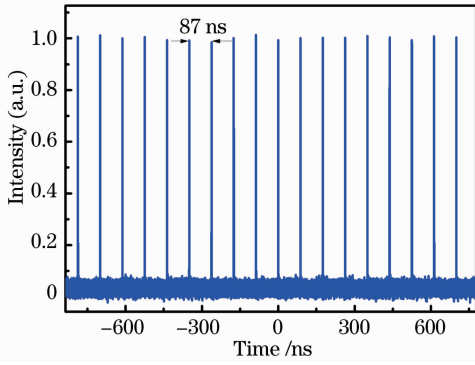


图 7 氧化石墨烯锁模耗散孤子光纤激光器脉冲串
Fig. 7 Pulse train of graphene oxide mode-locked dissipative soliton fiber laser

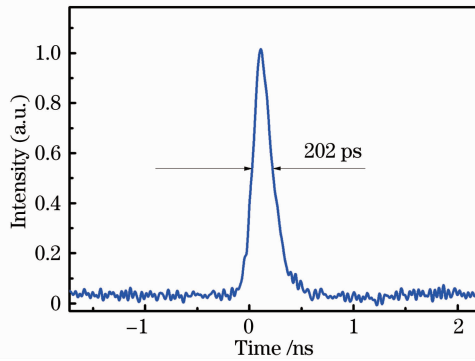


图 8 氧化石墨烯锁模耗散孤子光纤激光器脉冲宽度
Fig. 8 Pulse width of graphene oxide mode-locked dissipative soliton fiber laser

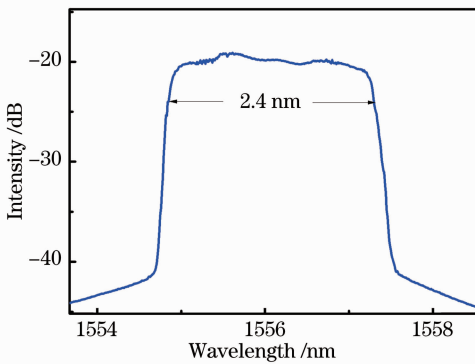


图 9 氧化石墨烯锁模耗散孤子光纤激光器输出光谱
Fig. 9 Optical spectra of graphene oxide mode-locked dissipative soliton fiber laser

激光器输出脉冲为耗散孤子。图 10 为脉冲输出的频谱图,锁模激光器基频为 11.49 MHz,信噪比为 71 dB。激光脉冲最大输出功率为 21 mW,相应的单脉冲能量为 1.8 nJ。输出功率主要受到抽运功率的限制,如进一步增加抽运功率将会得到更高的输出功率。

此外,通过提高色散补偿光纤与单模光纤的熔接效率,可以减小激光器的损耗,降低锁模阈值,进

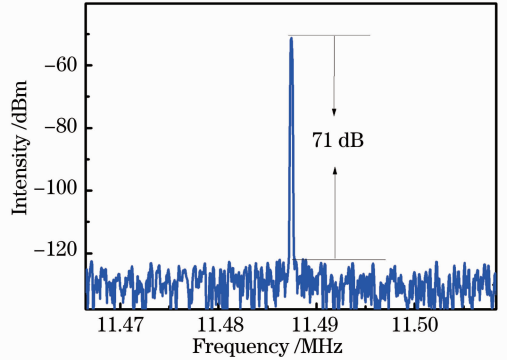


图 10 氧化石墨烯锁模耗散孤子光纤激光器信噪比
Fig. 10 Signal-to-noise ratio of graphene oxide mode-locked dissipative soliton fiber laser

而可以提高激光器的输出功率。由于激光器工作在正色散区,产生的是带有线性啁啾的耗散孤子,因此可以利用熔接一段单模光纤的方法来进行腔外脉冲压缩,提高峰值功率^[13]。

4 结 论

氧化石墨烯具有极强的亲水性及可饱和吸收性,且易于从天然石墨中制得,成本低廉,是一种极富应用前景的锁模材料。分别报道了运行于全负色散区和正色散区的氧化石墨烯被动锁模掺铒光纤激光器。当激光器运行在全负色散区时,得到了重复频率为 61 MHz,脉冲宽度为 500 fs 的传统孤子脉冲输出,最大输出功率为 6 mW,单脉冲能量 0.1 nJ。当激光器运行在正色散区时,得到了重复频率为 11.5 MHz、脉冲宽度为 143 ps 的耗散孤子脉冲输出,最大输出功率为 21 mW,单脉冲能量为 1.8 nJ。通过改进石墨烯可饱和吸收体的制备以及提高色散补偿光纤与单模光纤的熔接效率,可以进一步优化激光器的锁模特性、提高输出功率。

参 考 文 献

- 1 U Keller, D A B Miller, G D Boyd, *et al.*. Solid-state low loss intracavity saturable for Nd:YLF lasers: an A-FPSA[J]. *Opt Lett*, 1992, 17(7): 505-507.
- 2 S Y Set, H Yaguchi, Y Tanaka, *et al.*. Mode-locked fiber lasers based on a saturable absorber incorporating carbon nanotubes [C]. *Optical Fiber Communications Conference*, 2003. OFC, 2003. PD44.
- 3 Q L Bao, H Zhang, Y Wang, *et al.*. Atomic layer graphene as saturable absorber for ultrafast pulsed laser[J]. *Adv Funct Mater*, 2009, 19(19): 3077-3083.
- 4 Tawfigue Hasan, Zhipei Sun, Fengqiu Wang, *et al.*. Nanotube-polymer composites for ultrafast photonics [J]. *Adv Mater*, 2009, 21(38): 3874-3899.
- 5 J Xu, S D Wu, J Liu, *et al.*. Nanosecond-pulsed erbium-doped fiber lasers with graphene saturable absorber[J]. *Opt Commun*,

- 2012, 285(21): 4466–4469.
- 6 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 掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0802001.
 - 7 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铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0802003.
 - 8 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铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602006.
 - 9 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.
 - 10 Huang Wenyu, Feng Dejun, Jiang Shouzhen, *et al.*. Erbium-doped fiber laser based on single-layer graphene saturable absorber[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0202001.
黄文育, 冯德军, 姜守振, 等. 基于单层石墨烯可饱和吸收的掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0202001.
 - 11 Tian Zhen, Liu Shanliang, Zhang Bingyuan, *et al.*. Graphene mode-locked Er³⁺ doped fiber pulse laser[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0302004.
田 振, 刘山亮, 张丙元, 等. 石墨烯锁模掺铒光纤脉冲激光器的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0302004.
 - 12 Xu Jia, Wu Sida, Liu Jiang, *et al.*. Narrow line-width picosecond erbium-doped fiber lasers passively mode-locked with graphene oxide[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0702002.
徐 佳, 吴思达, 刘 江, 等. 基于氧化石墨烯被动锁模的窄线宽皮秒脉冲掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0702002.
 - 13 J Xu, S D Wu, H H Li, *et al.*. Dissipative soliton generation from a graphene oxide mode-locked Er-doped fiber laser[J]. Opt Express, 2012, 20(21): 23653–23658.
 - 14 J Xu, J Liu, S D Wu, *et al.*. Graphene oxide mode-locked femtosecond erbium-doped fiber lasers [J]. Opt Express, 2012, 20(14): 15474–15480.
 - 15 J Liu, S Wu, J Xu, *et al.*. Mode-locked 2 μm thulium-doped fiber laser with graphene oxide saturable absorber[C]. Quantum Electronics and Laser Science Conference, 2012. JW2A. 76.
 - 16 N I Kovtyukhova, P J Ollivier, B R Martin, *et al.*. Layer-by-layer assembly of ultrathin composite films from micron-sized graphite oxide sheets and polycations [J]. Chemistry of Materials, 1999, 11(3): 771–778.
 - 17 Xu Jia, Wu Sida, Liu Jiang, *et al.*. Passively Q-switched erbium-doped fiber laser with graphene oxide saturable absorber[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(12): 2783–2786.
徐 佳, 吴思达, 刘 江, 等. 氧化石墨烯被动调 Q 掺铒光纤激光器[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(12): 2783–2786.
 - 18 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.
 - 19 Gao Yuxin, Xu Wencheng, Luo Zhichao, *et al.*. Characteristics of the sideband asymmetry in a fiber ring laser[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 132–136.
高玉欣, 徐文成, 罗智超, 等. 环形腔光纤激光器中光谱边带不对称性特性研究[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 132–136

栏目编辑：张 腾