

基于石墨烯的被动锁模掺铒光纤孤子激光器

汪光辉 王志腾 陈宇 赵楚军 张晗 文双春

(湖南大学信息科学与工程学院微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 湖南长沙 410082)

摘要 报道了石墨烯作为可饱和吸收体的被动锁模掺铒光纤孤子激光器。采用环形腔结构,在抽运功率为 370.4 mW 时,产生了重复率为 3.16 MHz,脉宽约为 1.32 ps,平均输出功率为 1.07 mW 的锁模脉冲,其单脉冲能量为 0.338 nJ,并观察到激光中心波长在 1556.72~1558.76 nm 之间可调。基于 Ginzburg-Landau 方程进行了数值模拟,得到的结果和实验一致。

关键词 激光器;光纤激光器;石墨烯;被动锁模;可调谐

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0602003

Passively Graphene Mode-Locked Soliton Erbium-Doped Fiber Lasers

Wang Guanghui Wang Zhiteng Chen Yu Zhao Chujun Zhang Han Wen Shuangchun

(Key Laboratory for Micro/Nano Optoelectronic Devices, Ministry of Education, School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract A passively mode-locked erbium-doped fiber soliton laser based on graphene saturable absorber is reported. At a pump power of 370.4 mW, the pulse width is about 1.32 ps and the pulse repetition rate is 3.16 MHz with average output power of 1.07 mW, which corresponds to single pulse energy of 0.338 nJ. Moreover, the central wavelength can be tuned between 1556.72 nm and 1558.76 nm. The simulation based on Ginzburg-Landau equation is consistent with the experimental results.

Key words lasers; fiber lasers; graphene; passively mode-locking; wavelength-tunable

OCIS codes 140.3500; 140.3510; 140.3600; 140.4050

1 引 言

被动锁模光纤激光器因具有结构简单、系统紧凑、阈值低等优点而得到了人们的广泛关注^[1,2]。其中,波长可调谐的被动锁模光纤激光器已成为高速波分复用/光时分复用通信系统的关键器件之一,并在生物医学、光谱学等领域具有重要应用。通常被动锁模使用的可饱和吸收体有半导体可饱和吸收镜(SESAM)^[3]、碳纳米管(CNT)^[4]等。SESAM 作为可饱和吸收体具有稳定度高、可靠性好等优点^[5~7]。但是,SESAM 的成本偏高,且容易损伤^[8]。CNT 的可饱和吸收特性与管径和手性有关,可饱和吸收带宽有限^[9]。

石墨烯的出现为锁模技术的研究提供了更为广阔的空间。石墨烯是由单层的碳原子组成,具有零

能带隙结构的半金属特性,并与电子和空穴都呈线性能量色散关系^[10]。由于其独特的量子传输特性,石墨烯在高速电子器件中的应用引起了人们极大的兴趣^[11]。同时,石墨烯材料具有宽波长覆盖范围的可饱和吸收特性、超快的恢复时间和成本低等优点^[12,13],在光学领域引起广泛关注^[14~20]。2009 年, Bao 等^[21]将石墨烯作为可饱和吸收体在掺铒光纤激光器中进行锁模,输出了脉宽为 756 fs 的超短孤子脉冲。此后众多的国内外研究人员对石墨烯作为可饱和吸收体的锁模和调 Q 激光器进行了深入的研究^[14~20]。Zhang 等^[12]报道了利用石墨烯作为可饱和吸收体,分别在全反常色散腔、近零色散腔和全正常色散腔中进行锁模产生了稳定的孤子脉冲,其中心波长的调谐范围为 10~30 nm。Sun 等^[22]以

收稿日期: 2011-12-30; **收到修改稿日期**: 2012-03-07

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(60890202)和中央高校基本科研业务费资助课题。

作者简介: 汪光辉(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: wangguanghui2006@126.com

导师简介: 赵楚军(1979—),男,博士,副教授,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: cjzhao@hnu.edu.cn

石墨烯作为可饱和吸收体,通过腔内加入带通滤波器,获得中心波长在 1525~1559 nm 之间可调谐的孤子脉冲输出。田振等^[23]以石墨烯-PVA 薄膜为可饱和吸收体,在环形腔结构的光纤激光器中输出了重复频率为 8.7 MHz,脉宽为 10.29 ps 的锁模脉冲。刘江等^[24]以石墨烯可饱和吸收镜作为可饱和吸收体,在环形腔中实现了单脉冲能量高达 163 nJ 的锁模脉冲激光输出,在线性腔中实现了最窄脉冲宽度为 70 ns 的调 Q 激光输出;基于 6H-SiC 衬底外延石墨烯,实现了脉宽约为 520 ps 的锁模激光输出^[25]。Gui 等^[26]以石墨烯薄膜为可饱和吸收体进行锁模,输出了重复频率为 15.2 MHz,脉宽为 938 fs 的脉冲。

本文利用光沉积法制备了石墨烯可饱和吸收体,搭建了掺铒环形腔全光纤激光器,并基于 Ginzburg-Landau 方程数值分析了其工作原理。实验产生了重复频率 3.16 MHz,脉宽约 1.32 ps,平均输出功率 1.07 mW 的锁模孤子脉冲激光,其单脉冲能量为 0.338 nJ,而且通过调节偏振控制器,中心波长可以在 1556.72~1558.76 nm 之间调谐。

2 实验装置

石墨烯可饱和吸收体的制备过程如下:将 3 mg 石墨烯与 10 mL 二甲基甲酰胺溶液混合,超声振荡 1 h,然后静置 24 h,再取上层溶液离心 30 min,完成后取上层石墨烯分散液备用。将一段单模光纤的一端连接 980 nm 半导体激光源,另一端接一个光纤接头浸入到石墨烯分散液中。在出纤功率约为 80 mW 的情况下通光 2 min,然后将该光纤头置于温度为 22 ℃,湿度为 16% 的干燥箱中处理 2~3 h,最后连接另一光纤接头,作为激光器的可饱和吸收体^[8]。经测量,石墨烯厚度为 4~5 层,饱和和调制深度约为 40%。

激光器实验装置如图 1 所示,总腔长为 56.3 m,主要包括:掺铒光纤(EDF),标准单模光纤(SMF),光耦合器(OC),980/1550 nm 波分复用器(WDM),偏振无关隔离器(PII)和偏振控制器(PC)等。其中,EDF 长度为 2.7 m,群速度色散(GVD)为 $-22 \text{ ps}^2/\text{km}$;SMF 长度为 53.6 m,GVD 为 $-18 \text{ ps}^2/\text{km}$;OC 的耦合比为 10:90,10% 的一端作为输出端口,90% 的一端作为反馈端口;WDM 用来将抽运光和反馈光耦合进腔内;PII 保证腔内光的单向传输。抽运源为 Amonics 的 ALD-975-400-B-FA,中心波长为 975 nm。

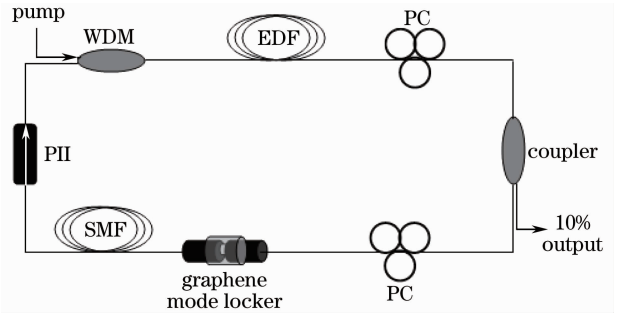


图 1 石墨烯被动锁模光纤激光器示意图

Fig. 1 Schematic set up of graphene passively mode-locked fiber laser

3 实验结果及讨论

在抽运源输出功率为 108 mW 时,通过调节 PC,激光器可以输出稳定的锁模脉冲。增加抽运功率,当抽运功率为 370.4 mW 时,光纤激光器输出锁模脉冲串的时域波形如图 2 所示,其重复频率为 3.16 MHz,这与通过 $f_c = c/(nL)$ (f_c 表示腔的基频, c 为真空中光速, n 为纤芯折射率, L 为腔长)计算得出的腔的基频相吻合。图 3 为输出锁模孤子脉

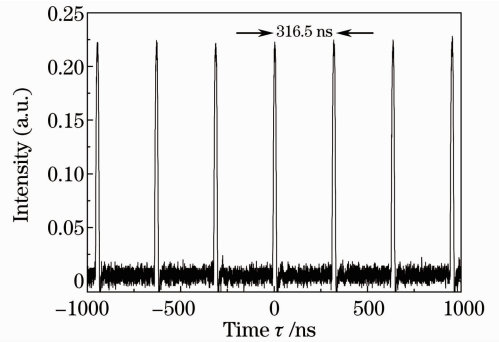


图 2 石墨烯锁模光纤激光器的输出脉冲串

Fig. 2 Output pulse train of graphene mode-locked fiber laser

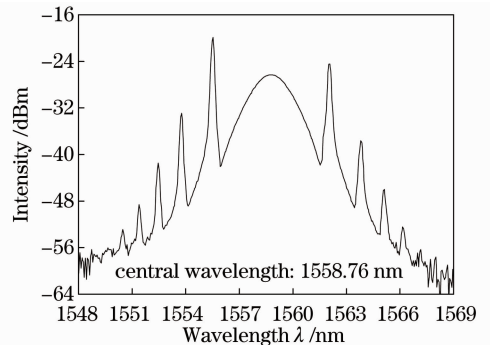


图 3 石墨烯锁模光纤激光器的输出光谱

Fig. 3 Output optical spectrum of graphene mode-locked fiber laser

冲的光谱图,清晰且对称的 Kelly 边带很好地说明了输出脉冲为孤子^[27],其中心波长为 1558.76 nm, 3 dB光谱带宽为 2.19 nm。孤子脉冲的自相关迹如图 4 所示,其半峰全宽(FWHM)为 2.03 ps,用双曲正割函数拟合,锁模脉冲的脉冲宽度为 1.32 ps,进一步得到时间带宽积为 0.356,此时输出的平均功率为 1.07 mW,单脉冲能量为 0.338 nJ。

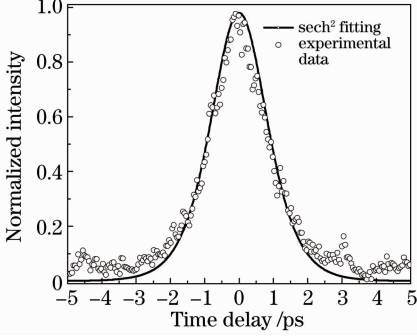


图 4 输出孤子脉冲串的自相关迹

Fig. 4 Autocorrelation trace of the soliton pulse train

通过仔细调节 PC,在实验中可以观察到孤子脉冲中心波长的调谐。在抽运功率为 370.4 mW 时,孤子的中心波长可以在 1556.72~1558.76 nm 之间调谐,如图 5 所示。考虑到掺铒光纤的增益带宽决定了可调谐的范围,而本实验中掺铒光纤的增益带宽比较窄,以及实验中损耗的影响,没有观察到更宽范围的调谐^[9]。

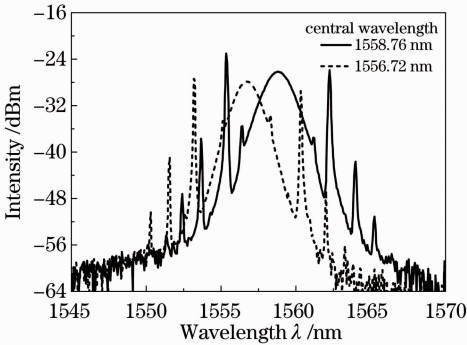


图 5 1556.72~1558.76 nm 可调谐输出光谱

Fig. 5 Output spectra from 1556.72 to 1558.76 nm

4 数值模拟

激光在光纤中的传输可以用耦合 Ginzburg-Landau 方程表示:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_h}{\partial Z} = & j \frac{\beta}{2} F_h - \delta \frac{\partial F_h}{\partial T} - k'' \frac{j}{2} \frac{\partial^2 F_h}{\partial T^2} + \\ & \frac{k'''}{6} \frac{\partial^3 F_h}{\partial T^3} + j\gamma (|F_h|^2 + \frac{2}{3} |F_v|^2) F_h + \end{aligned}$$

$$j \frac{\gamma}{3} F_h^* F_v^2 + \frac{g_p(T)}{2} F_h + \frac{g_p(T)}{2\Omega_g^2} \frac{\partial^2 F_v}{\partial T^2}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_v}{\partial Z} = & j \frac{\beta}{2} F_v - \delta \frac{\partial F_v}{\partial T} - k'' \frac{j}{2} \frac{\partial^2 F_v}{\partial T^2} + \\ & \frac{k'''}{6} \frac{\partial^3 F_v}{\partial T^3} + j\gamma (|F_v|^2 + \frac{2}{3} |F_h|^2) F_v + \\ & j \frac{\gamma}{3} F_v^* F_h^2 + \frac{g_p(T)}{2} F_v + \frac{g_p(T)}{2\Omega_g^2} \frac{\partial^2 F_h}{\partial T^2}, \quad (2) \end{aligned}$$

式中 F_h, F_v 分别表示激光脉冲沿光纤两正交偏振轴传输的归一化包络; $\beta = 2\pi B_m/\lambda$,表示两偏振模式的波数差,其中 λ 表示光波的中心波长; $B_m = |n_h - n_v|$,表示光纤的双折射强度,其中 n_h, n_v 分别表示沿两偏振方向的光纤折射率; $2\delta = 2\beta\lambda/2\pi c$,表示两偏振模式的群速度差; k'', k''' 分别表示二阶、三阶色散系数; γ 表示光纤的非线性系数; Ω_g 表示掺铒光纤的增益带宽; g_p 表示其饱和增益:

$$g_p = G \exp \left[- \frac{\int (|F_h|^2 + |F_v|^2) dt}{P_{\text{sat}}} \right], \quad (3)$$

式中 G 表示小信号增益系数, P_{sat} 表示归一化的饱和功率。

石墨烯的饱和吸收率 g_s^* 可表示为^[28]

$$\frac{\partial g_s^*}{\partial t} = - \frac{g_s^* - g_0^*}{\tau_{\text{rec}}} - \frac{|\phi|^2}{E_{\text{sat}}} g_s^*, \quad (4)$$

式中 g_0^* 表示吸收体的初始吸收率; $|\phi|^2 = |F_h|^2 + |F_v|^2$,其中 ϕ 表示光场强度; E_{sat} 表示吸收体的饱和能量; τ_{rec} 表示石墨烯的吸收恢复时间。

数值模拟中使用与实验相当的参数:腔长 $L = 56.6$ m,其中 $L_{\text{EDF}} = 2.7$ m, $L_{\text{SMF}} = 53.9$ m, $k''_{\text{EDF}} = -10$ ps²/km, $k''_{\text{SMF}} = -18$ ps²/km, $k''' = -0.1$ ps³/km, $\gamma = 3$ W⁻¹km⁻¹, $\Omega_g = 24$ nm, $P_{\text{sat}} = 50$ pJ, $E_{\text{sat}} = 0.6$ nJ, $g_0^* = 0.08$, $\tau_{\text{rec}} = 2$ ps, $G = 80$ 。当拍长 $L_b = 3$ mm 时,数值模拟得到了稳定的输出,其脉冲串传播如图 6 所示。改变偏振控制器的参数为 0.4π 和 1.3π 时,可观察到中心波长在 1557.47~1562.28 nm 之间可以调谐,如图 7 所示。在激光腔内,双折射滤波效应是不能被忽略的,它与掺铒光纤一起决定了激光器的有效增益大小和增益谱线,当调节 PC 时,可以改变腔内的双折射,那么腔内的双折射滤波效应的传输函数会随之改变^[9],相应光波的中心波长也会发生变化。

5 结 论

通过光沉积法制备了石墨烯可饱和吸收体,搭

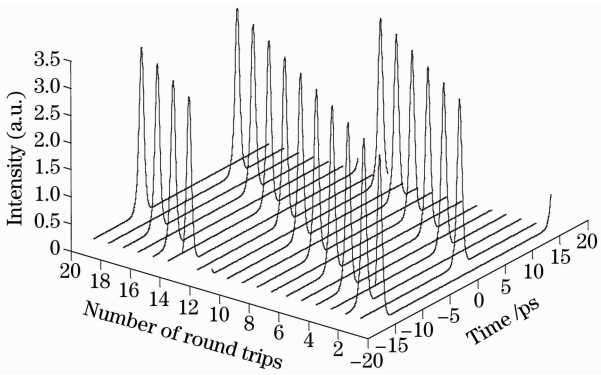


图 6 数值仿真得到的输出脉冲串

Fig. 6 Pulse evolution with cavity round trips of numerical simulation

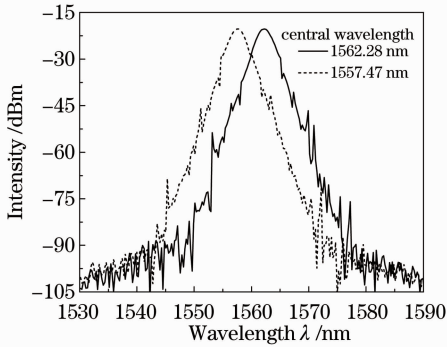


图 7 数值仿真得到的输出光谱

Fig. 7 Output spectra of numerical simulation

建了石墨烯被动锁模的环形掺铒光纤激光器,并根据耦合 Ginzburg-Landau 方程对激光器进行了数值模拟。在抽运源输出功率为 108 mW 时,激光器开始锁模。当抽运功率为 370.4 mW 时,产生了重复频率为 3.16 MHz,单脉冲能量为 0.338 nJ,脉冲宽度为 1.32 ps 的孤子锁模脉冲,调节 PC 观察到了激光中心波长在 1556.72~1558.76 nm 之间可以调谐。通过优化石墨烯可饱和吸收体的制备及激光腔的设计,激光器的可调谐特性及输出功率将会进一步提高。

参 考 文 献

1 V. J. Matsas, T. P. Newson, D. J. Richardson *et al.*. Self starting passively mode-locked fiber ring soliton laser exploiting nonlinear polarization rotation [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(15): 1391~1393
 2 M. Nakazawa, E. Yoshida, Y. Kimura. Generation of 98 fs optical pulses directly from an erbium-doped fiber ring laser at 1.57 μm[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(1): 63~65
 3 H. Zhang, D. Y. Tang, X. Wu *et al.*. Multi-wavelength dissipative soliton operation of an erbium-doped fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(15): 12692~12697
 4 F. Wang, A. G. Rozhin, V. Scardaci *et al.*. Wideband-tunable, nanotube mode-locked fiber laser[J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2008, **3**: 738~742

5 Ursula Keller, Kurt J. Weingarten, Franz X. Kärtner *et al.*. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1996, **2**(3): 435~452
 6 Antti Isomäki, Mircea D. Guina, Pietari Tuomisto *et al.*. Fiber laser mode-locked with a semiconductor saturable absorber etalon operating in transmission [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(20): 2150~2152
 7 Liu Pengzu, Hou Jing, Zhang Bin *et al.*. 1550 nm passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0702017
 刘鹏祖, 侯静, 张斌. 基于半导体可饱和吸收镜的 1550 nm 被动锁模光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0702017
 8 Amos 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
 9 H. Zhang, D. Y. Tang, R. J. Knize *et al.*. Graphene mode locked, wavelength-tunable, dissipative soliton fiber laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(11): 111112
 10 A. K. Geim, K. S. Novoselov. The rise of graphene[J]. *Nature Materials*, 2007, **6**(3): 183~191
 11 Y. M. Lin, C. Dimitrakopoulos, K. A. Jenkins *et al.*. 100-GHz transistors from wafer-scale epitaxial graphene [J]. *Science*, 2010, **327**(5966): 662
 12 H. Zhang, D. Y. Tang, L. M. Zhao *et al.*. Compact graphene mode-locked wavelength-tunable erbium-doped fiber lasers; from all anomalous dispersion to all normal dispersion[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2010, **7**(8): 591~596
 13 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
 14 K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov *et al.*. Two dimensional gas of massless dirac fermions in graphene [J]. *Nature*, 2005, **438**(7065): 197~200
 15 A. C. Ferrari, J. C. Meyer, V. Scardaci *et al.*. Raman spectrum of graphene and graphene layers[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(18): 187401
 16 Zhengqian Luo, Min Zhou, Jian Weng *et al.*. Graphene-based passively Q-switched dual-wavelength erbium-doped fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(21): 3709~3711
 17 Qiaoliang Bao, Han Zhang, Zhenhua Ni *et al.*. Monolayer graphene as a saturable absorber in a mode-locked laser[J]. *Nano Res.*, 2011, **4**(3): 297~307
 18 W. J. Cao, H. Y. Wang, A. P. Luo *et al.*. Graphene-based, 50 nm wide-band tunable passively Q-switched fiber laser [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2012, **9**(1): 54~58
 19 Qing Wang, Hao Teng, Yuwan Zou *et al.*. Graphene on SiC as a Q-switcher for a 2 μm laser [J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(3): 395~397
 20 Chunqing Gao, Ran Wang, Lingni Zhu *et al.*. Resonantly pumped 1.645 μm high repetition rate Er:YAG laser Q-switched by a graphene as a saturable absorber [J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(4): 632~634
 21 Q. L. Bao, H. Zhang, Y. Wang *et al.*. Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed laser [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2009, **19**(19): 3077~3083
 22 Z. Sun, D. Popa, T. Hasan *et al.*. A stable, wideband tunable, near transform-limited, graphene-mode-locked, ultrafast laser [J]. *Nano Res.*, 2010, **3**(9): 653~660
 23 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
- 24 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
- 25 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激光器[J]. 中国激光, 2011, **38**(8): 0802003
- 26 Lili Gui, Wei Zhang, Xiao Li *et al.*. Self-assembled graphene membrane as an ultrafast mode-locker in an erbium fiber laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(23): 1790~1792
- 27 S. M. J. Kelly. Characteristic sideband instability of periodically amplified average soliton[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(8): 806~807
- 28 N. N. Akhmediev, A. Ankiewicz, M. J. Lederer *et al.*. Ultrashort pulses generated by mode-locked lasers with either a slow or a fast saturable-absorber response[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(4): 280~282

栏目编辑: 宋梅梅