

熔锥光纤倏逝场作用石墨烯双波长锁模 掺镱光纤激光器

张 成 罗正钱 王金章 周 敏 许惠英 蔡志平

(厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005)

摘要 报道了利用熔锥光纤石墨烯饱和吸收体实现 $1\ \mu\text{m}$ 波段的双波长锁模掺镱光纤激光器(YDFL)。利用光学诱导沉积法,将水溶液中的石墨烯纳米复合物在光倏逝场的作用下沉积至熔锥光纤的锥腰部位。该石墨烯熔锥光纤器件作为可饱和吸收锁模部件具有制作灵活、全光纤结构以及高损伤阈值等优点。基于该器件的可饱和吸收及腔内双折射滤波特性,通过调节偏振控制器优化激光腔内偏振特性,实现了稳定的 YDFL 双波长锁模。该激光器的两个锁模波长分别为 $1034.77\ \text{nm}$ 和 $1038.85\ \text{nm}$,二次谐波锁模重复频率为 $1.09\ \text{MHz}$,腔内单脉冲能量最大可达 $35\ \text{nJ}$ 。

关键词 激光器;光纤激光器;石墨烯;熔锥光纤;倏逝场;被动锁模

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0602006

Dual-Wavelength Mode-Locked Yb-Doped Fiber Laser Based on the Interaction of Graphene and Fiber-Taper Evanescent Field

Zhang Cheng Luo Zhengqian Wang Jinzhang Zhou Min Xu Huiying Cai Zhiping

(Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract A dual-wavelength passively mode-locked Yb-doped fiber laser (YDFL) based on the interaction of graphene and fiber-taper evanescent field is reported. Using optical evanescent-light deposition technique, graphene-polymer nanocomposites in aqueous suspension are coated onto taper waist region. The graphene-based tapered-fiber as a saturable absorber has the advantages of flexibility, all-fiber configuration, and high optical damage threshold. Based on the saturable absorption of this graphene-based component and the cavity-birefringent filtering characteristics, the stable dual-wavelength mode-locked operation is obtained, by properly adjusting the polarization state of the laser cavity. The two mode-locked wavelengths of YDFL are $1034.77\ \text{nm}$ and $1038.85\ \text{nm}$, and the mode-locked repetition rate is $1.09\ \text{MHz}$ at the second harmonic frequency, and the intracavity pulse energy can reach $35\ \text{nJ}$.

Key words lasers; fiber laser; graphene; fiber taper; evanescent field; passively mode-locked

OCIS codes 140.3615; 140.4050; 160.4236; 140.3510

1 引 言

多波长锁模光纤激光器在光纤传感、光学信号处理、光电器件特性研究和波分复用技术等方面有重要的应用价值^[1]。目前已经有多种技术来实现多波长的主动锁模或者被动锁模^[2,3]。虽然主动锁模

在实现窄线宽和高重复频率方面具有优势,但多波长的被动锁模技术因其具有制作简单、体积小、低成本(无需外加调制器)、容易实现超短脉冲和较高的峰值功率等一系列优点而备受关注。

当前的被动锁模技术主要有三种:可饱和吸收

收稿日期: 2011-12-08; 收到修改稿日期: 2012-03-05

基金项目: 福建省自然科学基金(2011J01370)和厦门市科技计划(3502Z20113004)资助课题。

作者简介: 张 成(1988—),男,硕士研究生,主要从事光纤技术方面的研究。E-mail: zhangcheng811@126.com

导师简介: 蔡志平(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光电子技术方面的研究。

E-mail: zpcai@xmu.edu.cn(通信联系人)

体、非线性偏振旋转和非线性光纤环镜^[4~6]。最近,科学家发现石墨烯因其独特的二维原子结构表现出优越的可饱和吸收特性,例如低饱和吸收光强度、宽波段可饱和吸收、可控的调制深度及光纤兼容等,可以作为高性能可饱和吸收调 Q 或锁模器^[7~18]。目前,基于石墨烯纳米片^[7,8]、石墨烯聚合物薄膜^[11,15]和石墨烯溶液^[18]等形式的石墨烯饱和吸收体已被广泛用于产生锁模脉冲。然而在大多数石墨烯饱和吸收体的锁模光纤激光器中,石墨烯通常被放置在两个光纤接头之间,腔内激光直接穿透作用于石墨烯上极易导致石墨烯热损伤,从而不利于产生高能量锁模脉冲。相反,如果利用石墨烯和光倏逝场(如侧抛光纤^[19]、锥形光纤)之间的侧面相互作用来获得激光腔体的损耗调制,因为石墨烯仅与表面倏逝光相互作用,且暴露在空气中的石墨烯与光纤相互作用面积较大有助于散热,所以有望显著提高石墨烯饱和吸收体的热损伤阈值,进而获得更高的锁模脉冲能量和输出功率。特别令人感兴趣的是, Bao 等^[20]最近报道石墨烯和光倏逝场之间相互作用还可以起到很强的起偏特性。石墨烯引起的起偏特性和激光腔双折射相结合可构成一个双折射多波长滤波器。本文利用熔锥光纤石墨烯的饱和吸收特性和偏振效应,实现了双波长锁模的掺镜光纤激光器(YDFL)。

2 熔锥光纤石墨烯器件的制作

实验中所用的熔锥光纤石墨烯器件是在熔锥光纤的锥腰部位沉积石墨烯聚合物而制成,测得其调制深度约为 1.5%。熔锥光纤的制作主要分以下步骤:首先将单模光纤(Corning SMF-28)拉直后放在两个光纤钳上夹住,光纤钳分别固定在两个精密步进电机上;然后用高温火焰灼烧光纤并同时由电脑控制步进电机让光纤夹钳向两边拉伸光纤;最后获得了拉伸长度为 24 mm 以及锥腰直径为 3.2 μm 的熔锥光纤,熔锥过程造成的损耗约为 0.5 dB。为了锥形光纤的使用方便,实验中将熔拉好的锥形光纤放入 U 型铝片上,两边用紫外胶固定在铝片上以避免光纤的熔锥部分受到外力拉扯而折断。本实验使用的石墨烯是采用化学液相剥离去氧化法制备获得(详细制作方法请参考文献^[21]),用原子力显微镜表征石墨烯纳米片厚度约为 1 nm,证明其是少层石墨烯结构。而后再将聚 N-异丙基丙烯酰胺(PNIPAAm)和基丙烯酸(PAA)聚合物化学作用于石墨烯获得石墨烯纳米复合物。用化学滴管将石

烯聚合物溶液滴至熔锥光纤的锥腰部位,同时将 15.4 mW 的 974 nm 激光注入熔锥光纤中,并使用功率计实时监控沉积过程中透射功率的变化。当沉积过程持续约 2 min 后,石墨烯沉积引起的插入损耗变为 2.7 dB,此时关闭 974 nm 激光,将熔锥光纤从液滴中移出。图 1(a)是在光学显微镜下观察的石墨烯沉积熔锥光纤,可以看出石墨烯已经均匀沉积在锥腰部位,并且具有约 15 μm 的沉积长度及 1.5 μm 的沉积厚度。

图 1(b)是光倏逝场沉积石墨烯的原理图。当以光纤传输模式在锥腰部位传输时,由于有效折射率减小使得光纤模式被展宽,部分光扩散到空气中形成光倏逝场,随后与石墨烯聚合物液滴相互作用,最终使石墨烯纳米复合物沉积到锥腰上。光学诱导沉积石墨烯的物理机制已经在文献^[22,23]中报道,在本实验中概括为以下几个方面:1) 石墨烯对光的吸收造成液滴温度呈梯度分布,从而产生热泳现象,诱发石墨烯纳米颗粒沉积至锥腰部位;2) 局部加热造成悬浮在溶液中的介质颗粒产生强对流现象;3) 石墨烯高分子材料的偶极矩和光强度梯度分布相互作用而产生光镊作用,从而引起光学诱捕。

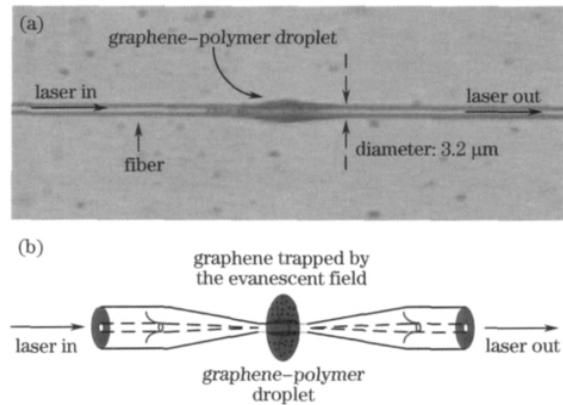


图 1 (a) 沉积后的熔锥光纤在 800 倍显微镜下的图像;
(b) 光倏逝场沉积石墨烯原理图

Fig. 1 (a) 800× microscope image of fiber taper after deposition; (b) principle diagram of deposition graphene in the evanescent field

3 实验结果与讨论

如图 2 所示,基于熔锥光纤石墨烯饱和吸收体的双波长锁模 YDFL 采用了反向抽运环形腔结构。抽运源为光纤耦合输出的半导体激光器,其中心波长为 974 nm,最大输出功率 176 mW。单模掺镜光纤(YDF)的长度为 30 cm,其在 974 nm 抽运波长的

吸收系数约为 250 dB/m。抽运光通过 974/1550 nm 波分复用器(WDM)注入 YDF 中。熔锥光纤石墨烯器件插入腔内起到饱和吸收体锁模作用,同时也起到弱的起偏效果。光纤隔离器(ISO)保证光在腔内顺时针单向传输,同时也可防止熔锥光纤石墨烯器件受自发辐射放大光的影响。偏振控制器(PC)可调节腔内双折射来优化双波长锁模。一段约 350 m 长的单模掺磷光纤插入激光器腔内,其在 1064 nm 的色散值约为 -4 ps/nm/km,截止波长为 1000 nm。其主要作用为:1) 加长激光腔长,降低锁模脉冲的频率,从而可以获得大脉冲的能量输出;2) 长的锁模腔有利于降低锁模的阈值^[4,10,17]。激光器谐振腔的总长度约为 379 m,故腔的基本振荡频率约 546 kHz。激光从耦合器(90:10 OC)的 10% 端输出,连接到光谱分析仪,或者经过光电转换后连接到频谱分析仪、示波器上监测锁模特性。

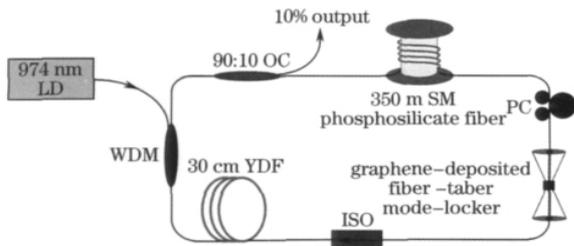


图 2 基于熔锥光纤石墨烯饱和吸收体的双波长锁模 YDFL 示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dual-wavelength mode-locked YDFL with fiber taper graphene based saturable absorber

当抽运功率达到 80 mW 时,有连续激光输出,此时平均输出功率为 $24.5 \mu\text{W}$ 。在抽运功率进一步增加到 104 mW 时,调节 PC 可以得到锁模脉冲输出,此时平均输出功率为 $671 \mu\text{W}$ 。抽运功率增加到 138 mW 时,优化 PC 状态,出现稳定的双波长锁模,图 3 为此时光谱分析仪(分辨率为 0.01 nm)测量的双波长锁模输出光谱,锁模的两个中心波长分别为 1034.77 nm 和 1038.85 nm,其线宽约为 0.07 nm,双波长的波长间距为 4.08 nm。在没有额外梳状滤波器的条件下,激光器仍能稳定的双波长状态运转,原因解释如下: Bao 等^[20]已证实石墨烯与侧抛光纤倏逝场相互作用可作为一个高性能的偏振器件,而在本实验中基于锥形光纤倏逝场与石墨烯相互作用形成的器件与其结构相似,亦可引起相应的起偏特性,故进一步结合腔内双折射可形成立奥(Lyot)双折射梳状滤波器。作为一个实例,利用相似的原理,

这种腔内双折射 Lyot 梳状滤波器已在文献[3]中用来实现多波长锁模。

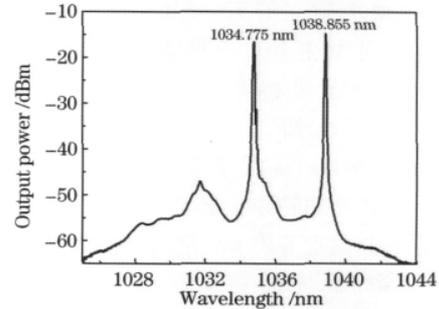


图 3 双波长锁模 YDFL 输出光谱

Fig. 3 Output spectrum of dual-wavelength mode-locked YDFL

由于激光器的腔长较长,脉冲分裂较易发生,而形成谐波锁模^[24]。根据文献^[25]报道,饱和吸收体吸收较弱时,容易出现谐波锁模。实验中熔锥光纤石墨烯器件的调制深度(约 1.5%)较低,且锁模腔长较长,较易促成谐波锁模,因此实验中的锁模激光大都稳定在二次谐波锁模状态,很难获得稳定的基频脉冲。

当抽运功率为 164 mW 时,实验中测量了双波长二次谐波锁模的典型示波器脉冲序列图。如图 4 所示,脉冲周期为 916 ns,重复频率为 1.09 MHz,为激光腔的基本振荡频率的两倍,进一步证明了激光器的二次谐波锁模运转。

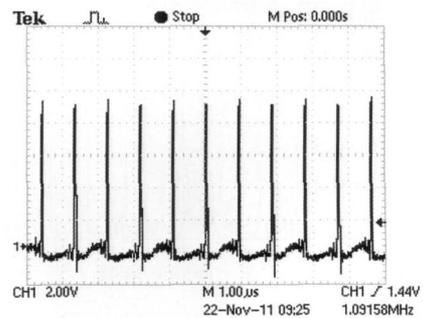


图 4 双波长二次谐波锁模脉冲序列

Fig. 4 Pulse train of dual-wavelength mode-locked pulse at the second harmonic

使用扫描精度 30 Hz 的频谱分析仪(HP 8593E),双波长锁模的频谱如图 5 所示。锁模的中心频率为 1.09165 MHz,与示波器中锁模脉冲的重复频率相一致。在 23 dB 处只有 150 Hz 的谱线宽度和 36 dB 的信噪比,充分证明了双波长锁模脉冲的稳定性。此外,实验中也测试了从 0 到 10 MHz 的谐波频谱图(如图 6 所示),二次谐波的频谱幅度

最强,表明激光器是二次谐波锁模运转,并具有很好的连续锁模特性。值得注意的是,本实验中去掉 350 m 的单模掺磷光纤后,不能获得稳定锁模脉冲状态。这是因为在全正色散被动锁模光纤激光器中,激光单脉冲能量必须足够高才能获得稳定的锁模脉冲序列^[26],去掉 350 m 后,锁模的基模频率将增加到 7.12 MHz,从而导致了过低的单脉冲能量,抑制了锁模脉冲的稳定运转。由于本实验中锁模脉冲的宽度至少大于 500 ps,常规的自相关仪的测量范围达不到,而实验室缺乏高速示波器(大于 5 GHz),也不能用探测器加示波器的方法测量,所以受限于实验室的硬件条件,未能测得锁模脉冲的脉冲宽度。

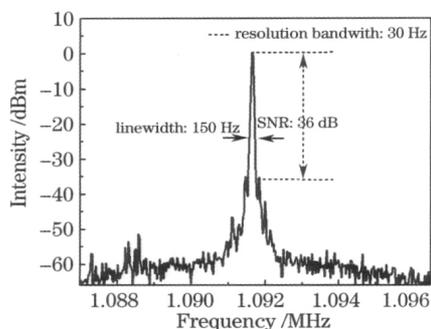


图 5 双波长锁模二次谐波频谱图

Fig. 5 Frequency spectrum of dual-wavelength mode-locked pulse at the second harmonic

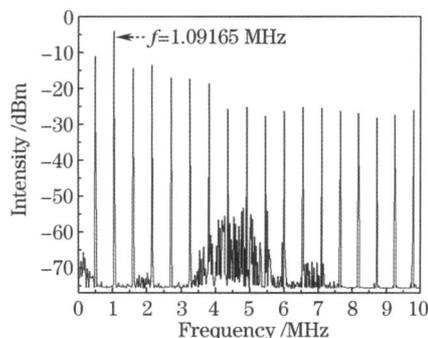


图 6 双波长锁模各次谐波频谱图

Fig. 6 Frequency spectrum of dual-wavelength mode-locked pulse at different harmonics

从抽运功率为 138 mW 时开始,每增加 5 mW 抽运功率测量一次平均输出功率,可以得到如图 7 所示的锁模单脉冲能量随抽运功率的变化曲线,锁模激光的单脉冲能量几乎随抽运功率成线性增加。输出的最大单脉冲能量为 3.5 nJ(相应于 3.4 mW 平均输出功率及 35 nJ 腔内脉冲能量),主要受限于实验中抽运激光二极管的最大输出功率 176 mW。相信继续增大抽运功率能获得更高的单脉冲能量。

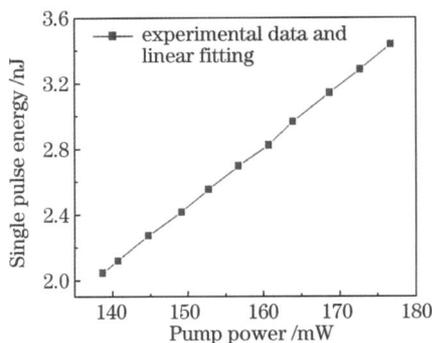


图 7 单脉冲能量与抽运功率的关系

Fig. 7 Relationship between single pulse energy and pump power

4 结 论

利用熔锥光纤的倏逝场诱导沉积石墨烯聚合物,获得了熔锥光纤石墨烯饱和吸收体,其具有制作灵活、全光纤结构及潜在的高损伤阈值等优点。利用熔锥光纤石墨烯器件作为饱和吸收体和弱起偏部件,实现了 YDFL 双波长被动锁模,其中心波长分别为 1034.77 nm 和 1038.85 nm,线宽为 0.07 nm。该激光器可以稳定运转在二次谐波锁模状态,重复频率 1.09 MHz,腔内最大单脉冲能量 35 nJ(受限于抽运源的最大功率 176 mW)。从锁模频谱中可观察到 23 dB 频谱线宽为 150 Hz 且信噪比达到 36 dB,证明二次谐波锁模具有较小的时间抖动及很好的稳定性。此外,激光器的性能可以通过优化石墨烯的质量以及熔锥光纤的参数等方法进一步提高,进而获得更高性能的锁模激光脉冲输出。

参 考 文 献

- Zhong Yihui, Zhang Zuxing. Research progress of passively mode locked fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(8): 46~51
- 钟义晖, 张祖兴. 被动锁模光纤激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(8): 46~51
- Luo Zhichao, Luo Aiping, Xu Wencheng. Multiwavelength picosecond and single wavelength femtosecond pulses emission in a passively mode-locked fiber laser using a semiconductor saturable absorber mirror and a contrast ratio tunable comb filter [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(18): 2831~2835
- Zhang Han, Tang Dingyuan, X. Wu *et al.*. Multi-wavelength dissipative soliton operation of an erbium-doped fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(15): 12692~12697
- Zhang Han, Tang Dingyuan, Zhao Luming *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
- Kong L. J., Xiao X. S., Yang C. X.. Low-repetition-rate all-fiber all-normal-dispersion Yb-doped mode-locked fiber laser[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2010, **7**(5): 359~362
- Zhong Y. H., Zhang Z. X., Tao X. Y.. Passively mode-locked

- fiber laser based on nonlinear optical loop mirror with semiconductor optical amplifier[J]. *Laser Phys.*, 2010, **20**(8): 1756~1759
- 7 Luo Zhengqian, Zhou Min, Weng Jian *et al.*. Graphene-based passively Q-switched dual-wavelength erbium-doped fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(21): 3709~3711
- 8 Tawfique Hasan, Sun Zhipei, Wang Fengqiu *et al.*. Nanotube-polymer composites for ultrafast photonics [J]. *Adv. Mater.*, 2009, **21**(38): 3874~3879
- 9 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掺镜光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0802001
- 10 Tian Zhen, Liu Shanliang, Zhang Bingyuan *et al.*. Graphene mode-locked Er doped fiber pulse laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0302004
田振, 刘山亮, 张丙元等. 石墨烯锁模掺镜光纤脉冲激光器的实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0302004
- 11 Sun Zhipei, Tawfique Hasan, Felice Torrisi *et al.*. Graphene mode-locked ultrafast laser [J]. *ACS Nano*, 2010, **4**(2): 803~810
- 12 Bao Qiaoliang, Zhang Han, Wang Yu *et al.*. Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2009, **19**(19): 3077~3083
- 13 Hyungseok Kim, Junhyun Cho, SungYeon Jang *et al.*. Deformation-immunized optical deposition of graphene for ultrafast pulsed lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **98**(2): 021104~021106
- 14 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
- 15 Zhang Han, Bao Qiaoliang, Tang Dingyuan *et al.*. Large energy soliton erbium-doped fiber laser with a graphene-polymer composite mode locker[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(14): 141103~141105
- 16 Sun Zhipei, Daniel Popa, Tawfique Hasan *et al.*. A stable wideband tunable near transform-limited graphene-mode-locked ultrafast laser[J]. *Nano Research*, 2010, **3**(9): 653~660
- 17 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镜光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0802003
- 18 Liu Zhibo, He Xiaoying, D. N. Wang. Passively mode-locked fiber laser based on a hollow-core photonic crystal fiber filled with few-layered graphene oxide solution [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(16): 3024~3026
- 19 YongWon Song, SungYeon Jang, WonSuk Han *et al.*. Graphene mode-lockers for fiber lasers functioned with evanescent field interaction [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(5): 051122~051124
- 20 Bao Qiaoliang, Zhang Han, Wang Bing *et al.*. Dingyuan Tang and Kian Ping Loh. Broadband graphene polarizer [J]. *Nat. Photonics*, 2011, **5**(7): 411~415
- 21 Luo Zhengqian, Zhou Min, Wu Duanduan *et al.*. Graphene-induced nonlinear four-wave-mixing and its application to multiwavelength Q-switched rare-earth-doped fiber lasers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(18): 2732~2739
- 22 Ken Kashiwagi, Shinji Yamashita. Deposition of carbon nanotubes around microfiber via evanescent light [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(20): 18364~18370
- 23 Amos Martinez, Kazuyuki Fuse, Xu Bo *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
- 24 Tang D. Y., Zhao L. M., Zhao B. *et al.*. Mechanism of multisoliton formation and soliton energy quantization in passively mode-locked fiber lasers[J]. *Phys. Rev. (A)*, 2005, **12**(4): 043816
- 25 C. E. S. Castellani, E. J. R. Kelleher, Z. Luo *et al.*. Harmonic and single pulse operation of a Raman laser using graphene[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2012, **9**(3): 223~228
- 26 C. Hönniger, R. Paschotta, F. Morier-Genoud *et al.*. Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(1): 46~56

栏目编辑: 宋梅梅