

基于 WS_2 可饱和吸收体的窄线宽皮秒 脉冲光纤激光器

徐成阳¹, 金亮^{1*}, 陈华龙¹, 张贺¹, 徐英添¹, 邹永刚¹, 马晓辉¹, 吴国盛², 隋庆学², 张志敏²

¹ 长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022;

² 陆军装甲兵驻长春地区军事代表室, 吉林 长春 130022

摘要 针对超短脉冲光纤激光器光谱线宽较大的问题进行研究, 利用 RP Fiber 软件对激光器腔内脉冲演化过程进行模拟计算, 分析了几种可饱和吸收体对激光器输出脉冲宽度和线宽的影响, 并对激光器的腔长和光纤布拉格光栅(FBG)参数进行了优化。最终, 根据优化结果, 搭建了一种基于 WS_2 可饱和吸收体的环形腔被动锁模皮秒脉冲掺铒光纤激光器, 并利用窄带 FBG 对输出脉冲的光谱线宽进行压缩, 获得了中心波长为 1549.4 nm、脉冲宽度为 171 ps 的窄线宽超短脉冲输出, 其 3 dB 光谱线宽为 0.02 nm。

关键词 激光器; 掺铒光纤激光器; 可饱和吸收体; 光纤布拉格光栅; 窄线宽脉冲

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0101007

Narrow Linewidth Picosecond Pulsed Fiber Lasers Based on WS_2 Saturable Absorber

Xu Chengyang¹, Jin Liang¹, Chen Hualong¹, Zhang He¹, Xu Yingtian¹, Zou Yonggang¹,
Ma Xiaohui¹, Wu Guosheng², Sui Qingxue², Zhang Zhimin²

¹ State Key Laboratory of High-Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China;

² Military Representative Office of Army Armored Forces in Changchun, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The problem of large spectral linewidth of ultrashort pulse laser is studied. The pulse evolution process in the laser cavity is simulated by RP Fiber software. The effects of different saturable absorber versus the pulse width and spectral linewidth on the laser are studied, and the cavity length and fiber Bragg grating (FBG) parameters of the laser are optimized. Finally, a passively mode-locked picosecond pulse erbium-doped ring fiber laser based on WS_2 saturable absorber is designed according to the optimization results. The spectral linewidth of the output pulse is compressed by the narrowband FBG, and a narrow linewidth ultrashort-pulse output with center wavelength of 1549.4 nm, pulse width of 171 ps and 3 dB spectral linewidth of 0.02 nm is obtained.

Key words lasers; erbium-doped fiber laser; saturable absorber; fiber Bragg grating; narrow linewidth pulse

OCIS codes 140.3500; 060.3735; 320.5390

1 引 言

光纤激光器具有转换效率高、结构紧凑、光束质量好、热管理方便等特点, 在相干合成、激光雷达、激

光测距及通信等领域具有广泛的应用前景^[1-3]。而超短脉冲窄线宽光纤激光器能够同时获得 ps~fs 级的超短脉冲宽度和窄的光谱线宽, 越发受到人们的关注^[4-6]。目前所报道的获得超短脉冲窄线宽激

收稿日期: 2017-07-18; 收到修改稿日期: 2017-09-11

作者简介: 徐成阳(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事非线性光学和光纤激光器方面的研究。

E-mail: shq18xycy@163.com

导师简介: 马晓辉(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光电子器件及应用方面的研究。E-mail: mxh@cust.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: namemichael@163.com

光的方式主要是被动锁模技术,包括非线性偏振旋转(NPR)锁模和可饱和吸收体锁模。NPR锁模主要是通过调节光路内偏振控制器实现不同的非线性相移来实现锁模,因而环境稳定性较差。可饱和吸收体锁模是利用可饱和吸收材料的非线性吸收特性作用于腔内的辐射,产生周期性的调制实现锁模。目前已报道的所报道的实现被动锁模的方法主要有非线性偏振旋转(NPR)锁模^[7]和基于锁模材料进行非线性吸收两种方式。NPR锁模主要是通过调节光路内偏振控制器实现不同的非线性相移,因而环境稳定性较差。目前已报道的可应用于被动锁模的可饱和吸收体主要有半导体可饱和吸收镜(SESAM)、碳纳米管(CNT)、石墨烯、拓扑绝缘体(TI)以及过渡金属硫化物(WS₂)等^[8-16]。

2012年,徐佳等^[17]利用窄带光纤布拉格光栅(FBG)和氧化石墨烯可饱和吸收镜构成线型谐振腔,实现了稳定的重复频率为5.82 MHz,脉冲宽度为87 ps,3 dB光谱线宽为0.06 nm的锁模脉冲激光输出。2015年,任军等^[18]分别以氧化石墨烯与半导体可饱和吸收镜作为可饱和吸收体,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。2016年,邹峰等^[19]报道了基于主振荡功率放大(MOPA)结构的GHz级窄线宽、高峰值功率纳秒光纤激光器,获得了中心波长为1064.12 nm,脉冲宽度为3.92 ns,光谱线宽为1.5 GHz,峰值功率为15 kW的脉冲激光输出。2017年,Liu等^[15]利用WS₂作为可饱和吸收体,搭建了环形腔被动锁模光纤激光器,获得了脉冲宽度为67 fs,光谱线宽为114 nm的超短脉冲输出。

目前,大多数超短脉冲光纤激光器中使用的FBG都是宽谱光栅,输出脉冲的光谱线宽通常在几纳米到几十纳米之间,无法实现窄线宽脉冲输出。基于此,本文针对不同可饱和吸收体对输出脉冲的影响进行了分析计算,对锁模材料参数和谐振腔进行了优化。选用窄线宽FBG,压窄输出脉冲的光谱线宽,并对此结构进行了建模计算与实验分析。最终,在抽运功率为180 mW时,获得了输出功率为1.21 mW的稳定脉冲输出,其脉冲宽度为171 ps,中心波长为1549.4 nm,3 dB光谱线宽为0.02 nm。

2 建模与计算

可饱和吸收体的调制深度(MD)和饱和能量对于被动锁模光纤激光器输出光脉冲宽度和线宽有重要影响。锁模光纤激光器的光脉冲传输方程为

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2}(\beta_2 + ig_c T_2^2) \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} = i\left(\gamma + \frac{i}{2}\alpha_2\right) |A|^2 A + \frac{1}{2}(g_c - \alpha)A, \quad (1)$$

式中 A 为脉冲的慢变包络, $|A|^2$ 代表光功率, α 包含光纤的损耗特性, α_2 代表双光子吸收效应的损耗, β_2 为群速度色散参量, γ 为非线性参量, g_c 为增益系数。脉冲宽度与可饱和吸收体的关系为

$$\tau_p = \frac{1.07}{\Delta\Omega_g} \sqrt{\frac{g}{\Delta R}}, \quad (2)$$

式中 g 表示腔内单程饱和振幅增益系数, $\Delta\Omega_g$ 表示增益介质的光谱半宽度, ΔR 表示可饱和吸收体调制深度。可以看出,随着 ΔR 的增加,脉冲宽度 τ_p 呈减小趋势。

2.1 不同参数的可饱和吸收体对输出脉冲的影响

一般情况下,不同材料可饱和吸收体的吸收特性不同,相同材料不同制备方式也会导致可饱和吸收体的吸收特性产生差异。相比较而言,石墨烯及氧化石墨烯(GO)材料的可饱和吸收体调制深度较低,而不同层数的石墨烯及氧化石墨烯也会使得其饱和吸收特性不同。而最新发现的拓扑绝缘体和过度金属硫化物等新可饱和吸收体材料由于其带隙及结构特性,拥有较高的调制深度。表1为几种不同结构的可饱和吸收体调制深度的参考值^[10-15]。

表1 可饱和吸收体参数

Table 1 Parameters of saturable absorber

Material	Modulation depth / %	Structure
GO	1.4	single layer of GO paper
Graphene	4.8	20 graphene layers
Sb ₂ Te ₃	7.42	deposited on tapered fiber
CNT	15.8	single-wall nanotube films
Bi ₂ Te ₃	19	nanosheets
WS ₂	35.1	deposited on tapered fiber

在单模抽运功率为100 mW、饱和能量为0.05 nJ,其他参数不变的情况下,计算结果如图1(a)所示。结果表明,在调制深度为1.4%~35.1%时,可饱和吸收体的调制深度越大,激光器的输出脉冲宽度 τ_p 就会越窄,受到时间带宽积的限制,相应的光谱线宽也越宽,该计算结果与(2)式相符。当可饱和吸收体的调制深度过小时,脉冲宽度变化缓慢,可饱和吸收体达到饱和的时间也比较长,不利于激光器实现锁模。当可饱和吸收体的调制深度较大时,激光器锁模自启动的阈值相应降低,激光器更容易实现锁模。

图 1(b)为输出脉冲的宽度和光谱线宽随饱和能量的变化关系。当可饱和吸收体的饱和能量小于 0.05 nJ 时,随着饱和能量的增加,脉冲能量大于可饱和吸收体的饱和能量,可饱和吸收体达到了充分饱和,脉冲宽度变窄,光谱线宽变宽。当可饱和吸收体的饱和能量大于 0.05 nJ 且抽运功率和脉冲能量不变时,随着饱和能量的增加,可饱和吸收体未达到充分吸收,锁模阈值随着饱和能量的增加而提高,可

饱和吸收体的饱和吸收损耗增加,使得脉冲宽度变宽,相应的光谱线宽变窄。而一般来说,通过可饱和吸收体的脉冲能量通常是饱和能量的几倍,脉冲能量如果更大的话,则容易产生多脉冲,原因是如果脉冲能量远远超过饱和能量,则可饱和吸收体达到了充分饱和,其透射率就不再是脉冲能量的强依赖函数。因此,在可饱和吸收体的饱和能量较低时,更容易获得稳定的脉冲。

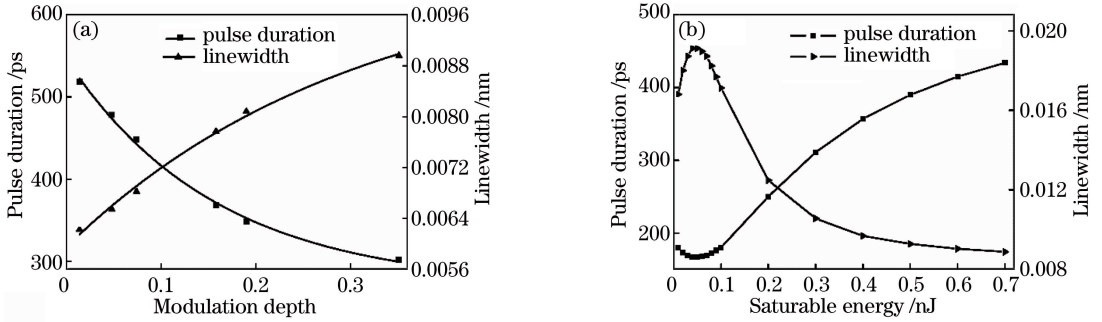


图 1 输出光脉冲宽度和光谱线宽与饱和吸收体的(a)调制深度和(b)饱和能量的关系

Fig. 1 Output pulse duration and linewidth versus (a) modulation depth and (b) saturable energy

图 2(a)、(b)为分别应用表 1 中几种可饱和吸收体时获得的输出脉冲的脉冲宽度和光谱线宽随抽运功率的变化曲线。随着抽运功率增加,输出光脉冲宽度变窄,光谱线宽变宽。调制深度较低的氧化石墨烯在抽运功率为 30 mW 时达到最大输出功率,进一步增加抽运功率将会导致单脉冲能量过大,产生脉冲分裂现象,无法获得稳定的锁模输出。而调制深度越高的材料,能够承受的抽运功率越高,调制深度最高的 WS₂ 在抽运功率大于 700 mW 时,才会产生脉冲分裂

现象。由于调制深度为 19% 的 Bi₂Te₃ 材料能够承受的最大抽运功率为 220 mW,所以图 2 只给出抽运功率在 0~300 mW 之间的脉冲输出结果。由图 2(a)可知,在相同的抽运功率条件下,与其他几种材料相比,使用 WS₂ 材料作为可饱和吸收体所获得的输出光脉冲宽度最小、可承受的抽运功率最大。与此同时,由图 2(b)可知,当抽运功率为 120~220 mW 时,WS₂ 作为可饱和吸收体获得的光脉冲线宽比其他锁模材料更窄,表明其具有压缩线宽的作用。

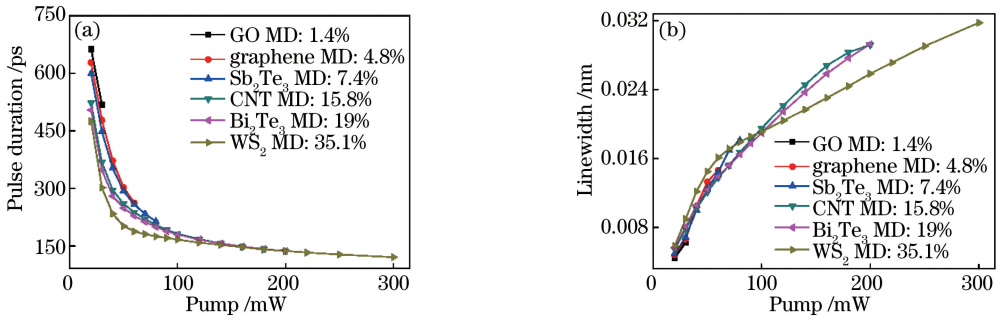


图 2 输出光脉冲随抽运功率变化。(a)脉冲宽度;(b)光谱线宽

Fig. 2 Output pulse versus pump power. (a) Pulse duration; (b) linewidth

2.2 FBG 带宽和腔长对输出脉冲的影响

FBG 带宽和激光谐振腔长度 L 也是影响脉冲宽度和光谱线宽的重要因素。FBG 带宽与输出脉冲的关系如图 3(a)所示,随着 FBG 带宽的增加,输出光的光谱线宽逐渐增加,单脉冲能量也随之变大,由于时间带宽积的限制,其脉冲宽度随之减小,导致脉冲峰

值功率上升,使得自相位调制效应增大,非线性相移得到累积导致脉冲分裂。当 FBG 带宽小于 0.02 nm 时,谐振腔内纵模数量大大减少,抑制了非线性相移,脉冲宽度会迅速增加,达到纳秒量级。另外,针对不同腔长对光谱线宽和脉冲宽度的影响进行了计算,其结果如图 3(b)所示,腔长增加会使腔内产生多纵模

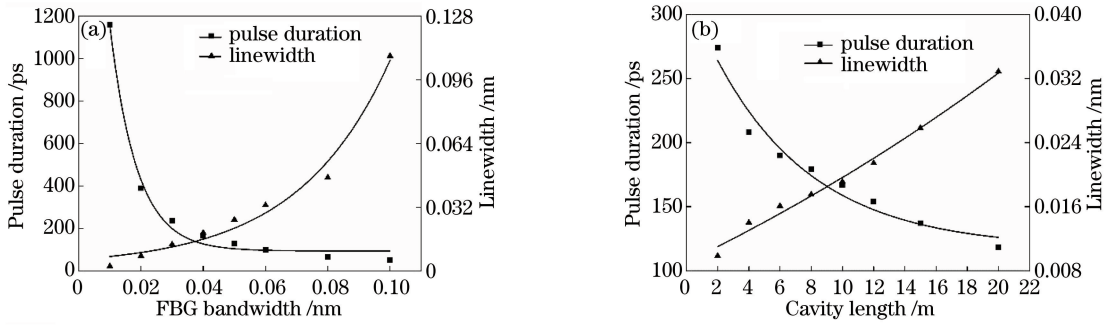


图 3 输出光脉冲宽度和光谱线宽与(a) FBG 带宽和(b)腔长的关系

Fig. 3 Output pulse duration and linewidth versus (a) FBG bandwidth and (b) cavity length

振荡,使输出光的光谱线宽增加,降低输出光的脉冲宽度,但是腔长过长引起的自相位调制效应会使非线性相移累积过大,锁模不稳定导致脉冲分裂。所以,综合考虑脉冲宽度与光谱线宽,实验拟选择 FBG 带宽为 0.04 nm,激光器腔长为 10 m。

3 实验与分析

图 4 为环形腔超短脉冲窄线宽光纤激光器结构图,抽运源为波长 976 nm 的半导体激光器,通过波分复用器(WDM)将抽运光耦合至长度为 1 m 的掺 Er³⁺ 增益光纤中,增益光纤为 Nufern 公司的 EDFC-980-HP,纤芯直径为 3.2 μm,模场直径为 5.8 μm,在抽运波长处的吸收系数约为 6.5 dB/m。增益光纤的另一端与光隔离器(偏振无关)相连接,光隔离器一方面可以有效抑制环形腔的反向传输激光,提高光路系统的隔离度,增加系统的单频输出稳定性。另一方面,可有效隔离包层中的残余抽运光,隔离器另一端连接一个偏振控制器,通过调节腔内激光的偏振态,实现稳定的光脉冲输出。激光光通过偏振控制器后通过光环行器进入可饱和吸收体进

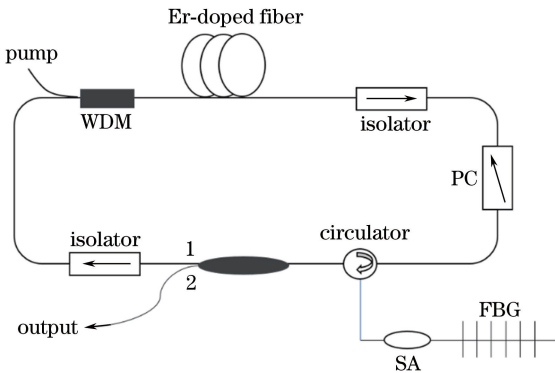


图 4 基于 WS₂ 锁模的窄线宽超短脉冲环形腔光纤激光器结构示意图

Fig. 4 Schematic of narrow-linewidth ultrashort-pulse ring fiber laser on WS₂

行锁模。根据模拟仿真得到的结果,实验选择 WS₂ 材料作为可饱和吸收体,通过光纤熔接机对单模光纤进行拉锥,其光纤锥腰处的直径为 12 μm,熔融区域的有效长度为 3 mm。然后采用脉冲激光沉积的方法将 WS₂ 材料沉积到锥形光纤的熔融区域上,再用热缩管将沉积有 WS₂ 饱和吸收体的拉锥区进行覆盖,以防止材料被氧化或破坏。之后由窄带 FBG 进行线宽压缩并将光脉冲反射回腔内。根据之前的模拟结果,FBG 参数为中心波长为 1550 nm,反射率为 99%,线宽为 0.04 nm。之后通过输出耦合比为 10:90 的耦合器。一部分光通过耦合器继续在腔内振荡,另一部分光通过耦合器输出,获得窄线宽脉冲激光输出。

图 5 所示为根据测试数据拟合的输出光脉冲宽度和光谱线宽随抽运功率的变化曲线。随着抽运功率的增加,脉冲宽度变窄、光谱线宽增宽。当抽运功率超过 550 mW 时,单脉冲能量过大,导致脉冲分裂。根据实验,在抽运功率为 180 mW 时,其脉冲啁啾量最小,有利于获得超短光脉冲,同时实现窄线宽输出,且输出脉冲最为稳定,实验得到的光脉冲输出如图 6 所示。输出光的脉冲宽度为 171 ps,中心波长为 1549.4 nm,3 dB 光谱线宽为 0.02 nm。

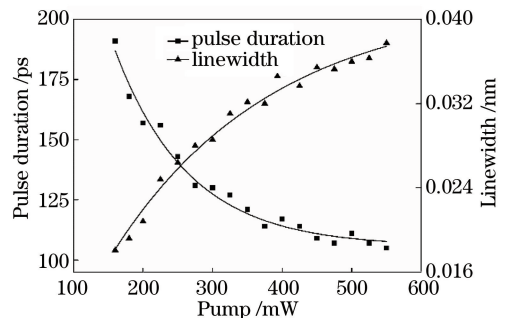


图 5 输出光脉冲宽度和光谱线宽随抽运功率的变化
Fig. 5 Output pulse duration and linewidth versus pump power

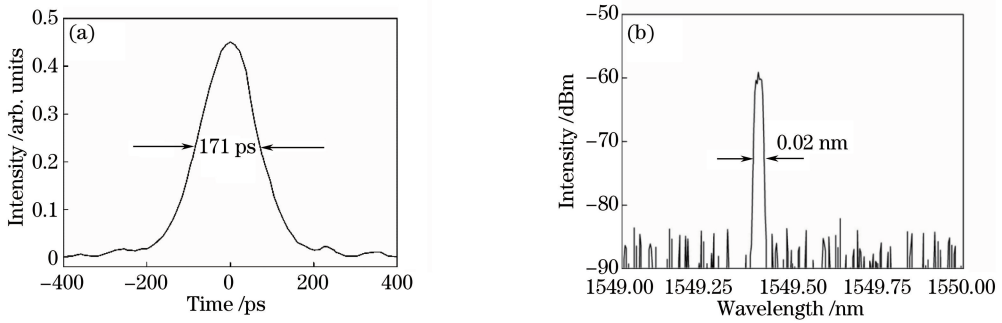


图 6 抽运功率为 180 mW 时的输出光脉冲。(a)脉冲宽度;(b)输出光谱

Fig. 6 Output pulse at 180 mW pump power. (a) Pulse duration; (b) output spectrum

4 结 论

围绕超短脉冲光纤激光器的脉冲宽度和光谱线宽展开了研究,分析了不同可饱和吸收体的调制深度和饱和能量与输出脉冲的脉冲宽度和光谱线宽的关系,并对 FBG 参数和谐振腔长进行优化。从模拟结果中发现,在可饱和吸收体调制深度较高、饱和能量较小的情况下,更容易获得稳定的脉冲输出,而且脉冲宽度和光谱线宽均较小。根据计算结果,搭建了基于 WS₂ 锁模的光纤激光实验系统,最终在抽运功率为 180 mW 时,得到了中心波长为 1549.4 nm、重复频率为 18.8 MHz、脉冲宽度为 171 ps 的稳定光脉冲,最大平均功率为 1.21 mW,3 dB 光谱线宽为 0.02 nm。

参 考 文 献

[1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [Invited] [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.

[2] Ehlers P, Silander I, Wang J, *et al.* Fiber-laser-based noise-immune cavity-enhanced optical heterodyne molecular spectrometry instrumentation for Doppler-broadened detection in the 10-12 cm⁻¹ Hz^{-1/2} region[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2012, 29(6): 1305-1315.

[3] Ahmad H, Muhammad F D, Chang H P, *et al.* Dual-wavelength fiber lasers for the optical generation of microwave and terahertz radiation [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, 20(5): 166-173.

[4] Shi W, Leigh M, Zong J, *et al.* Power scaling for narrow linewidth C-band pulsed fiber lasers using a highly Er/Yb co-doped phosphate glass fiber [C]. SPIE, 2008, 6890: 68900K.

[5] Shi W, Petersen E B, Leigh M, *et al.* High-energy

single-mode single-frequency all-fiber laser pulses covering C-band based on highly co-doped phosphate glass fibers[C]// Proceedings of SPIE, 2009, 7195: 71951H.

[6] Jiao Z, Zhang B, Wang B. Linearly polarized and narrow-linewidth pulse generation at high repetition rate from an all-fiber gain-switched Thulium-doped fiber laser[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 55 (2): 58-61.

[7] Lyu Y, Li J, Hu Y, *et al.* Theoretical comparison of NPR and hybrid mode-locked soliton thulium-doped fiber lasers [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9 (1): 1500711.

[8] Popa D, Sun Z, Torrisi F, *et al.* Sub 200 fs pulse generation from a graphene mode-locked fiber laser [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97 (20): 203106.

[9] Luo J, Yang S, Hao Q, *et al.* Precise locking the repetition rate of a SESAM mode-locking all polarization maintaining fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0206003.
罗浆, 杨松, 郝强, 等. SESAM 锁模全保偏光纤激光器重复频率的精确锁定 [J]. 光学学报, 2017, 37 (2): 0206003.

[10] Boguslawski J, Sotor J, Sobon G, *et al.* Graphene oxide paper as a saturable absorber for Er- and Tm-doped fiber lasers[J]. Photonics Research, 2015, 3 (4): 119-124.

[11] Sotor J, Pasternak I, Krajewska A, *et al.* Sub-90 fs a stretched-pulse mode-locked fiber laser based on a graphene saturable absorber [J]. Optics Express, 2015, 23(21):27503-27508.

[12] Liu W, Pang L, Han H, *et al.* 70-fs mode-locked erbium-doped fiber laser with topological insulator [J]. Scientific Reports, 2016, 5: 19997.

[13] Wang J, Cai Z, Xu P, *et al.* Pulse dynamics in carbon nanotube mode-locked fiber lasers near zero cavity dispersion[J]. Optics Express, 2015, 23(8): 9947-9958.

- [14] Yan P, Lin R, Chen H, *et al.* Topological insulator solution filled in photonic crystal fiber for passive mode-locked fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(3): 264-267.
- [15] Liu W, Pang L, Han H, *et al.* Tungsten disulfidesaturable absorbers for 67 fs mode-locked erbium-doped fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2950-2959.
- [16] Yang C Y, Liu M L, Yu W T, *et al.* Q-switched characteristics of tungsten disulfide Er-doped fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0703015.
杨春玉, 刘孟丽, 于维天, 等. 二硫化钨掺铒光纤激光器调 Q 特性 [J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0703015.
- [17] Xu J, Wu S D, Liu J, *et al.* Narrow line-width picosecond Erbium-doped fiber lasers passively mode-locked with graphene oxide [J]. *Chinese Journal of 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.
- [18] Ren J, Wu S D, Cheng Z C, *et al.* Mode-locked femtosecond Erbium-doped fiber laser based on graphene oxide versus semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 0602013.
任军, 吴思达, 程昭晨, 等. 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 [J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0602013.
- [19] Zou F, Wang Z K, Wang Z W, *et al.* Gigahertz narrow-linewidth high-peak power nanosecond fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0701001.
邹峰, 王兆坤, 王子薇, 等. 吉赫兹级窄线宽、高峰值功率纳秒光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0701001.