

doi:10.3788/gzxb20184701.0114001

基于啁啾光纤布拉格光栅的掺镱保偏锁模光纤激光研究

孙江^{1,2,3}, 侯磊^{1,2,3}, 林启蒙^{1,2,3}, 白杨^{1,2,3}, 陆宝乐^{1,2,3},
陈浩伟^{1,2,3}, 冯晓强^{1,2,3}, 白晋涛^{1,2,3,4}

(1 西北大学 光子学与光子技术研究所光电技术与纳米功能材料国际联合研究中心, 西安 710069)

(2 西北大学 光子学与光子技术研究所陕西省全固态激光及应用工程技术研究中心, 西安 710069)

(3 西北大学 光子学与光子技术研究所陕西省光电子技术重点实验室, 西安 710069)

(4 西北大学 物理学院, 西安 710069)

摘 要: 利用啁啾光纤布拉格光栅作为光谱滤波器和色散控制元件来控制掺镱保偏锁模光纤激光的光谱形状和腔内色散. 实验装置采用线性腔设计, 利用半导体饱和吸收镜作为锁模器件, 实现掺镱保偏光纤激光器的被动锁模激光输出. 当泵浦功率为 52 mW 时, 获得了脉冲宽度为 4.26 ps, 重复频率为 15.7 MHz, 平均功率为 9.8 mW 的稳定锁模脉冲激光输出. 输出激光中心波长为 1 030 nm, 3dB 谱宽为 7.2 nm, 对应理想傅里叶变换极限脉宽约为 150 fs.

关键词: 锁模激光; 掺镱光纤激光器; 保偏光纤; 可饱和吸收体; 啁啾光纤光栅

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)01-0114001-6

All-polarization Maintaining Mode-locked Yb-doped Fiber Laser with Chirped Fiber Bragg Grating

SUN Jiang^{1,2,3}, HOU Lei^{1,2,3}, LIN Qi-meng^{1,2,3}, BAI Yang^{1,2,3}, LU Bao-le^{1,2,3},
CHEN Hao-wei^{1,2,3}, FENG Xiao-qiang^{1,2,3}, BAI Jin-tao^{1,2,3,4}

(1 *National Center for International Research of Photoelectric Technology and Functional Materials, Institute of Photonics and Photon-Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China*)

(2 *Shaanxi Engineering Technology Research Center for Solid State Lasers and Application, Northwest University, Xi'an 710069, China*)

(3 *Institute of Photonics and Photon-technology, Provincial Key Laboratory of Photo-electronic Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China*)

(4 *Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China*)

Abstract: High stability mode-locked fiber laser whose key is to obtain a stable mode-locked pulse output has broad applications in the optical frequency comb, micro-processing and other fields. In this paper, chirped fiber Bragg grating, as the spectral filter and the dispersion control element, has been used to control the spectral shape and chromatic dispersion of the Yb-doped fiber laser. The mode-locked polarization maintaining fiber laser was obtained by semiconductor saturated absorption mirror. The maximum output power of laser was 9.8 mW by the pump power of 52 mW. The fundamental repetition

基金项目: 国家自然科学基金(No.61475125), 西北大学科学研究基金(No.15NW06), 陕西省国际科技合作与交流计划项目(No.2016KW-040)资助

第一作者: 孙江(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤激光器. Email: sjxd2016@163.com

导 师: 冯晓强(1974—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为全固态激光器、光纤激光器等. Email: xqfeng@nwu.edu.cn

通讯作者: 侯磊(1986—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为超短脉冲激光及应用. Email: lhoul@nwu.edu.cn

收稿日期: 2017-07-06; 录用日期: 2017-09-05

<http://www.photon.ac.cn>

rate was 15.7 MHz. The center wavelength and the spectral bandwidth were 1 030 nm and 7.2 nm, respectively. The pulse width was measured to be 4.26 ps, corresponding ideal Fourier transform limit pulse width is about 150 fs.

Key words: Mode-locked laser; Yb-doped fiber laser; Polarization-maintaining; Saturable absorber; Chirped fiber Bragg gratings

OCIS Codes: 140.4050; 140.5960; 320.1590; 320.5390; 320.7090

0 引言

目前,窄脉冲宽度和高峰值功率的被动锁模光纤激光器已经越来越引起人们的关注,在基础科学研究、生物诊断和激光加工等领域中有着广泛的应用^[1].为了得到稳定的锁模脉冲,通常采用可饱和吸收体作为锁模启动的核心器件,如半导体可饱和吸收体(Semiconductor Saturable Absorbing Mirror, SESAM)^[2],石墨烯,氧化石墨烯^[3],单壁碳纳米管^[4-5],拓扑绝缘体^[6]等.此外,非线性偏振旋转(Nonlinear Polarization Rotation, NPR)和非线性光学环路镜(Nonlinear Loop Mirror, NOLM)也可以作为非线性光学开关来产生超短脉冲激光.在各种不同的掺杂稀土光纤中,掺杂 Yb 光纤以其简单的能级结构、宽的增益带宽、高的光转换效率、大的饱和因子以及较长的上能级寿命等特点^[7],目前已经广泛的应用于双光子聚合和 3D 印刷中^[8-10].此外,对 1 μm 波段的超短脉冲光纤激光器而言,其主要困难在于如何补偿二氧化硅光纤引起的正常材料色散.对于掺镱超短脉冲光纤激光器而言,色散主要来源于掺 Yb 光纤增益介质与光纤器件附带普通光纤引入的正常材料色散.因此,为了实现超短脉冲激光输出,我们必须通过在腔内引入负色散元件来实现腔内色散的有效控制,比如光纤布拉格光栅,空间棱镜或光栅对^[11-12].

早在 2007 年, Ori Katz 等第一次利用啁啾光纤布拉格光栅(Chirped Fiber Bragg Grating, CFBG)实现了重复频率为 45 MHz, 脉冲宽度为 3.6 ps 的纳瓦级掺镱光纤锁模激光输出,但是,整个系统采用普通单模光纤,环境稳定性较差^[13].同年, B. Ortaç 等将 SESAM 固定在光纤端面,利用一个 CFBG 组成的线型腔实现了脉宽 15.4 ps, 重复频率为 20.30 MHz 的掺镱锁模脉冲激光输出^[14].2008 年, B. Ortaç 等在已有工作的基础上,通过在光纤尾部和 SESAM 之间引入望远镜系统使得 SESAM 达到饱和阈值,获得光谱宽度为 1.79 nm(3 dB), 脉宽为 21.8 ps, 重复频率为 44.2 MHz 的稳定掺镱锁模脉冲,最后利用光栅对将脉宽压缩到 1.5 ps^[15].2012 年,北京理工大学的刘江等利用 CFBG 组成短线型腔,实现了重复频率高达 843 MHz, 3 dB 光谱宽度为 0.13 nm, 脉冲宽度为 21 ps, 时间带宽积为 0.72 的锁模脉冲输出^[16].同年, M. Baumgartl 等通过选用不同参数的 FBG, 获得脉宽在 30-200 ps, 重复频率在 0.7-6 MHz 的低重复频率窄带宽皮秒脉冲输出^[17].2014 年,国防科技大学的宋锐等研究了光栅的宏观参数对锁模激光脉冲输出的影响,最终实现了重复频率为 27.6 MHz, 3 dB 光谱带宽为 0.3 nm 的锁模脉冲^[18].2015 年, S. Boivinet 等人通过选用不同带宽的 FBG, 实现了脉宽小于 7 ps, 重复频率为 3.3 MHz 的低重复频率锁模脉冲.2016 年,天津大学宋有建课题组实现了脉宽为 6.63 ps, 3 dB 光谱带宽为 0.3 nm, 重复频率为 10.4 MHz 的锁模脉冲,并研究脉冲的时间抖动^[19].此外,本课题组的王洋等利用窄带宽 FBG 和 SESAM 实现了重复频率为 24.7 MHz, 脉冲宽度为 6.3 ps, 3 dB 光谱带宽为 0.22 nm 的掺镱锁模光纤激光器^[20].综上所述,在现有的研究当中,虽然不同课题组都实现了重复频率兆赫兹、脉冲宽度皮秒级的稳定输出,但是输出光谱宽度较窄(对应理想极限脉冲宽度较窄),从而限制了获得更短脉宽激光输出.同时考虑到上述系统多是单模光纤激光系统,为了获得更加稳定的更短脉宽的激光系统,本文重点对保偏掺镱锁模光纤系统进行研究.

本文使用 CFBG 和 SESAM 作为激光谐振腔端镜,搭建了线型被动锁模掺镱保偏光纤激光器,实现了宽光谱,高单脉冲能量的稳定锁模输出.当泵浦功率为 52 mW 时,通过仔细调节 SESAM 的位置和角度,可以实现稳定的锁模运转.总的输出功率可达到 9.756 mW, 重复频率 15.7 MHz, 脉冲宽度为 4.26 ps, 3 dB 光谱带宽为 7.2 nm.

1 实验装置及工作原理

理论上,采用分布傅立叶算法(Split Step Fourier)^[13,21-22]求解非线性薛定谔(Ginzburg-Landau)方程(Nonlinear Schrödinger Equation, NLSE)模拟激光谐振器内脉冲的演化过程.图 1(a)为 SESAM 锁模激光

器理论模型,包括保偏啁啾光纤布拉格光栅(CFBG),保偏单模光纤(Polarization Maintaining Fiber, PMF),掺镱增益光纤(Gain fiber),增益后的保偏单模光纤(PMF)和半导体可饱和吸收体(SESAM).模拟时,CFBG色散量系数为 0.24 ps/nm,工作中心波长为 1 030 nm,工作带宽为 10 nm,增益光纤为芯径 6 μm ,长度 70 cm,增益 400 dB/m 的掺镱光纤;SESAM 的调制深度为 32%,饱和能流密度为 110 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$,非饱和吸收损耗为 20%,弛豫时间为 500 fs;增益光纤前后分别为 1.5 m 和 4.35 m 的 PM980 单模保偏光纤.假设保偏光纤和增益光纤的二阶色散为 23 fs^2/mm ,三阶非线性系数 $\gamma=0.0064(\text{W}\cdot\text{m})^{-1}$.图 1(b)给出了时域上信号从白噪声起振到形成锁模脉冲的自洽过程.图中横坐标代表的是脉冲宽度,纵坐标为腔内循环周期.从图中我们可以看出,脉冲在前 10 个周期主要是从白噪声中提取种子脉冲,从 10 到 30 个周期,其中种子脉冲经过增益光纤不断放大,并通过 SESAM 饱和吸收效应实现脉冲的进一步压缩.在 30 个周期以后可以形成稳定的锁模孤子脉冲输出,每次循环脉冲宽度保持不变.通过对被动锁模激光系统的数值模拟,最终可以为实验方案及元件参数的设计提供了必要的理论指导.

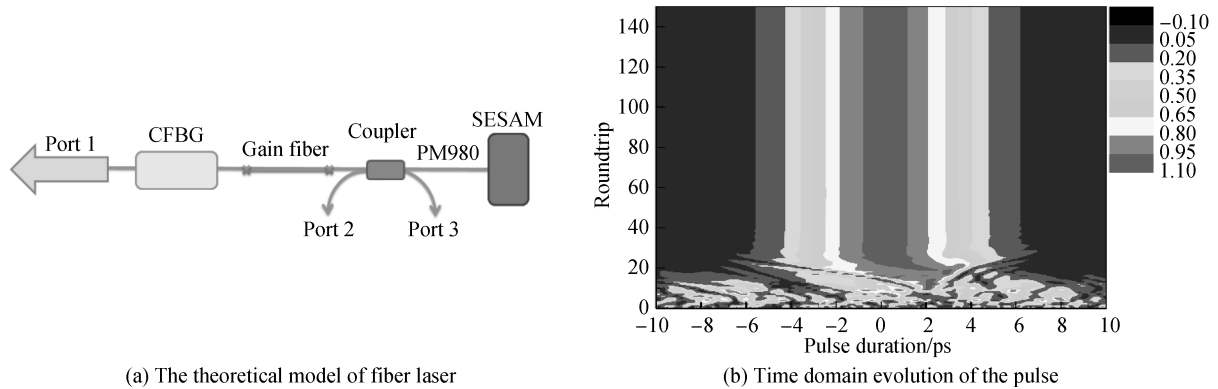


图 1 激光器理论模型和脉冲的时域演化图

Fig.1 The theoretical model of fiber laser and time domain evolution of the pulse

在理论模拟的基础上,搭建如图 2 所示保偏掺镱锁模光纤激光器,激光腔采用典型的线型腔结构,SESAM 和 CFBG 充当谐振腔的两个端镜.泵浦源采用中心波长为 976 nm,最大输出功率为 400 mW 的保偏单模半导体激光器,泵浦光经 980/1 030 nm 波分复用器(Wavelength Division Multiplexer, WDM)耦合进入 CFBG(中心波长为 1 030 nm,光谱带宽为 10 nm,色散量为 0.24 ps/nm).CFBG 直接刻在保偏光纤 PM980 上来提供负色散并且充当激光谐振腔的一个端镜.CFBG 的另一端熔接一段长为 0.7 m 较高掺杂浓度的掺 Yb 保偏光纤作为增益介质,其吸收系数为 250 dB/m@915 nm.在增益光纤和聚焦器之间熔接一个 30 : 70 的 2 \times 2(30%作为输出端口)光纤耦合器,两个端口可以用来研究腔内孤子的演化过程和监视锁模的稳定情况.采用光纤聚焦器将激光聚焦到 SESAM 上,通过仔细调节 SESAM 的位置和角度,以便达到最佳的锁模脉冲输出效果.其中 SESAM 的调制深度为 32%,饱和能流密度为 110 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$,非饱和吸收损耗为 20%,弛豫时间为 500 fs.除了 0.7 m 的掺 Yb 光纤,激光腔内其它光纤均为 PM980 的保偏光纤.

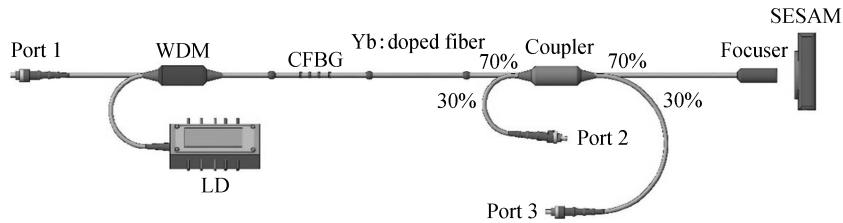


图 2 掺镱线性光纤激光器的实验装置示意图

Fig.2 Experimental configuration of the Yb-doped fiber laser with linear cavity

2 结果与讨论

随着泵浦光的增加,激光器可以实现自启动稳定锁模输出.当泵浦功率达到 52 mW 时,通过仔细调节 SESAM 的位置和角度,可以实现稳定的锁模运转.锁模时,输出端口 1(port1)的输出功率最大可以达到

5.19 mW, 输出端口 2(port 2)输出功率最大可以达到 3.94 mW, 输出端口 3(port 3)的输出功率最大可以达到 0.626 mW, 总的输出功率为 9.756 mW, 重复频率为 15.7 MHz, 对应的单脉冲能量为 0.62 nJ, 脉冲峰值功率为 146 W. 谐振腔的光学长度为 6.55 m, 由腔长计算得到脉冲重复频率为 15.79 MHz, 与测量值符合的很好. 图 3 为采用示波器(Agilent Technologies DSO9104A)测量得到的锁模脉冲序列, 图中分别为 50 ns/div 和 10 μ s/div 对应的脉冲序列. 可以看出在一个腔长周期内只有一个脉冲, 脉冲间隔为 63 ns, 与 6.55 m 的腔长相匹配, 可以排除谐波锁模造成的多脉冲状态. 从 10 μ s/div 的脉冲序列图中可以看出脉冲非常稳定, 脉冲顶端平整, 并没有相应的调制包络, 说明锁模非常稳定并无调 Q 现象.



图 3 稳定的锁模脉冲序列

Fig.3 Stable mode-locked pulse sequence

为了研究锁模状态的稳定性, 用频谱分析仪(Keysight N9000A)测量了脉冲的频谱分布. 在图 4(a)给出了分辨率带宽为 300 kHz 测量范围 100 MHz 的脉冲谐波射频谱, 可以看出脉冲的重复频率为 15.7 MHz. 图 4(b)为基频 15.7MHz 在 1 kHz 分辨率带宽下的频谱, 可以看出激光器频谱信号的信噪比大于 70 dBc, 频谱信号非常干净, 并没有出现调 Q 包络, 证明激光器具有很高的锁模质量.

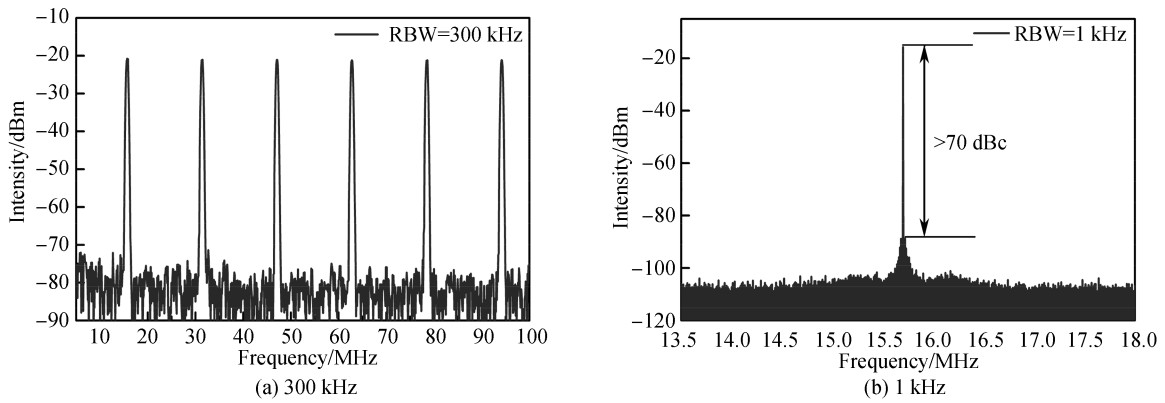


图 4 不同分辨率带宽的频谱图

Fig.4 RF spectrum with different resolution bandwidth

当泵浦功率比较低时, 腔内只有连续脉冲. 随着泵浦功率的增大, 连续光的周围会出现调幅信号. 通过调节泵浦功率和 SESAM 的位置和角度, 会出现较强的调 Q 脉冲, 当泵浦功率增加到 52 mW 时, 出现稳定的锁模脉冲. 采用光栅光谱仪(AQ6370C, YOKOGAWA)对其锁模光谱进行测量. 如图 5(a)所示, 其中, 虚线代表线型的锁模输出光谱, 实线代表对数锁模输出光谱, 中心波长为 1 030 nm, 3 dB 光谱宽度为 7.2 nm, 理

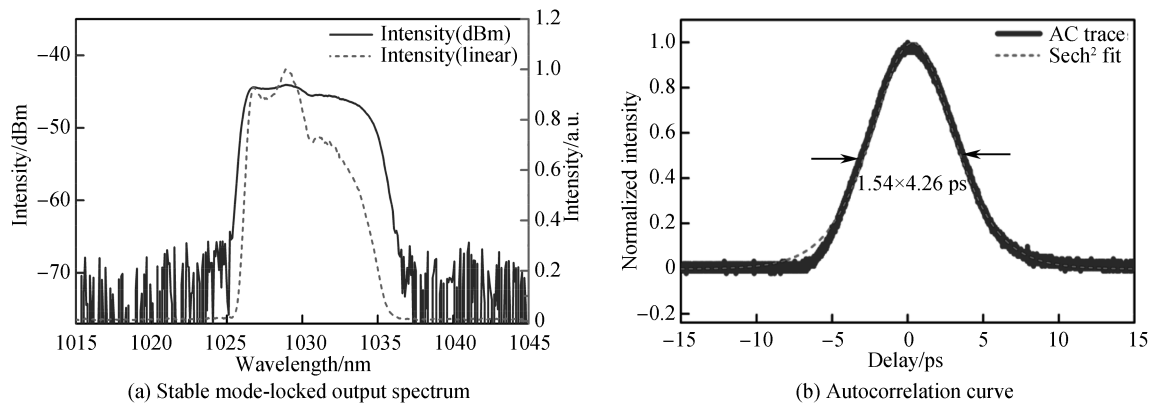


图 5 稳定锁模状态下的光谱图和自相关曲线

Fig.5 Stable mode-locked output spectrum and the autocorrelation curve

论上支持 150 fs 的脉冲宽度(假设脉冲为双曲正割型).腔内色散分析结果表明,整个腔内净色散量为负值,因此激光器工作在负色散区域.同时长时间测量光谱,仍具有很好的光谱稳定性.此外利用强度自相关仪(FEMTOCHROME FR-103WS)测得输出脉冲的强度自相关信号如图 5(b)所示.其中实线代表实验测量值,虚线是采用双曲正割拟合的结果,经拟合可得到稳定锁模脉冲的脉宽约为 4.26 ps,主要原因还是腔内存在大量的正色散,使得脉冲展宽.如果腔外对脉冲进一步色散补偿,则可对输出脉宽进行压缩.

3 结论

采用啁啾布拉格光栅(CFBG)和半导体可饱和吸收体(SESAM)作为激光腔镜,组建了线型保偏掺镱被动锁模光纤激光器.当泵浦功率为 52 mW 时,通过仔细调节 SESAM 的位置和角度,可以实现稳定的锁模运转.总的输出功率可达到 9.8 mW,重复频率为 15.7 MHz,脉冲宽度为 4.26 ps,中心波长为 1 030 nm,相应 3 dB 光谱宽度为 7.2 nm,对应理想傅里叶变换极限脉宽约为 150 fs,单脉冲能量为 0.62 nJ,脉冲峰值功率为 146 W.多次的开关机实验中,激光器都可以实现自启动和稳定的单脉冲锁模.后续的工作我们准备采用该激光器作为种子源对其功率进行放大,为超短脉冲激光光纤在光学频率梳、微加工等领域的应用研究打好基础.

参考文献

- [1] AGNESI A, CARRA L, MARCO C D, *et al.* Fourier-limited 19-ps Yb-fiber seeder stabilized by spectral filtering and tunable between 1015 and 1085 nm[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2012, **24**(11): 927-929.
- [2] LIN J H, CHEN C C. Switchable mode-locking states in an all-fiber all-normal-dispersion ytterbium-doped laser[J]. *Laser Physics*, 2010, **20**(11): 1984-1989.
- [3] CHEN Hou-ren, TSAI Chih-ya, CHENG Hsin-ming, *et al.* Passive mode locking of ytterbium-and erbium-doped all-fiber lasers using graphene oxide saturable absorbers[J]. *Optics Express*. 2014, **22**(11): 12880-12889.
- [4] KIVISTÖ S, HAKULINEN T, KASKELA A, *et al.* Carbon nanotube films for ultrafast broadband technology[J]. *Optics Express*. 2009, **17**(4): 2358-2363.
- [5] WANG F, ROZHIN A, SCARDACI V, *et al.* Wideband-tunable, nanotube mode-locked, fibre laser[J]. *Nature Nanotechnology*. 2008, **3**(12): 738-742.
- [6] ZHAO Chu-jun, ZOU Yan-hong, CHEN Yu, *et al.* Wavelength-tunable picosecond soliton fiber laser with topological insulator: Bi₂Se₃ as a mode locker[J]. *Optics Express*. 2012, **20**(25): 27888-27895.
- [7] LIMPERT J, RÖSER F, SCHREIBER T, *et al.* Ultrafast high power fiber laser systems[J]. *Comptes Rendus Physique*. 2006, **7**(2): 187-197.
- [8] RILL M S, PLET C, THIEL M, *et al.* Photonic metamaterials by direct laser writing and silver chemical vapour deposition[J]. *Nature Materials*. 2008, **7**(7): 543-546.
- [9] THIEL M, FISCHER H, VON FREYMAN G, *et al.* Three-dimensional chiral photonic superlattices[J]. *Optics Letters*. 2010, **35**(2): 166-168.
- [10] LIMPERT J, ROSE F, SCHREIBER T, *et al.* High-power ultrafast fiber laser systems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2006, **12**(2): 233-244.
- [11] KATZ O, SINTOV Y S. All-fiber picosecond ytterbium fiber laser utilizing chirped-fiber-Bragg-gratings for dispersion control[J]. *Optics Communications*. 2008, **281**(10): 2874-2878.
- [12] ILDAY F Ö, CHEN J, KÄRTNER F. Generation of sub-100-fs pulses at up to 200 MHz repetition rate from a passively mode-locked Yb-doped fiber laser[J]. *Optics Express*. 2005, **13**(7): 2716-2721.
- [13] KATZ O, SINTOV Y, NAFCHA Y, *et al.* Passively mode-locked ytterbium fiber laser utilizing chirped-fiber-Bragg-gratings for dispersion control[J]. *Optics Communications*. 2007, **269**(1): 156-165.
- [14] ORTAÇ B, SCHREIBER M T, LIMPERT J, *et al.* Experimental and numerical study of pulse dynamics in positive net-cavity dispersion modelocked Yb-doped fiber lasers[J]. *Optics Express*. 2007, **15**(23): 5595-15602.
- [15] ORTAÇ B M, LIMPERT J. Self-starting passively mode-locked chirped-pulse fiber oscillator[J]. *OSA/ASSP*. 2008, **15**(25): 16794-16799.
- [16] LIU Jiang, XU Jia, WANG Pu. High repetition-rate narrow bandwidth SESAM mode-locked Yb-doped fiber lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2012, **25**(4): 539-541.
- [17] BAUMGARTL M, ABREUAFONSO J, DIEZ A, *et al.* Environmentally stable picosecond Yb fiber laser with low repetition rate[J]. *Applied Physics B*. 2012, **111**(1): 39-43.
- [18] SONG Rui, HOU Jing, WANG Yan-bin, *et al.* Ytterbium-doped fiber laser passively mode-locked by a semiconductor saturable absorber mirror in linear cavity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(1): 102007.
宋锐,侯静,王彦斌,等. 线性腔半导体可饱和吸收镜被动锁模掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2014, **41**(1): 102007.

- [19] CHEN Wei, SONG You-jian, JUNG K, *et al.* Few-femtosecond timing jitter from a picosecond and all-polarization-maintaining Yb-fiber laser[J]. *Optics Express*. 2016, **24**(2): 1347-1357.
- [20] WANG Yang, LU Bao-le, QI Xin-yuan, *et al.* Environmentally-stable pulse energy-tunable picosecond fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, **29**(1): 150-153.
- [21] LIN Q, AGRAWAL G P. Raman response function for silica fibers[J]. *Optics Letters*. 2006, **31**(21): 3086-3088.
- [22] GUMENYUK R, KOROBKO D A, ZOLOTOVSKY I O, *et al.* Role of cavity dispersion on soliton grouping in a fiber lasers[J]. *Optics Express*. 2014, **22**(2): 1896-905.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61475125), The Scientific Research Foundation of Northwestern University (No.15NW06) and Shaanxi Province International Science and Technology Cooperation and Exchange Project (No.2016KW-040)