

激光与光电子学进展

706 MHz 高重复频率掺镱光纤飞秒激光器

杜迎生, 袁帅*, 王勇, 沈嘉伟, 曾和平

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海, 200093

摘要 利用非线性偏振旋转锁模机理, 选用高增益系数的掺镱光纤, 设计了两种新型器件(“偏振分光器+法拉第旋转器”和波片轴)并搭建了一套超短腔长的锁模光纤激光器, 最终实现了重复频率为 706 MHz 的锁模脉冲输出。在 1.5 W 的泵浦抽运功率下, 激光器锁模后可以达到平均输出功率为 260 mW、脉冲宽度为 158 fs 的激光脉冲。该激光器在锁模情况下, 能够在 72 h 内稳定运行, 其结构更有利于小型化和便携化高重复频率系统。

关键词 激光器; 光纤激光器; 非线性偏振旋转; 重复频率; 增益光纤

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0914004

706 MHz High Repetition Rate Femtosecond Yb-Doped Fiber Laser

Du Yingsheng, Yuan Shuai*, Wang Yong, Shen Jiawei, Zeng Heping

*School of Optoelectronic Information and Computer Engineering,**University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*

Abstract We use nonlinear polarization rotation mode-locked mechanism and high-gain-coefficient Ytterbium-doped fiber to design two new devices (polarization splitter + Faraday rotator and wave plate axis) and build a set of ultra-short cavity length mode-locked fiber lasers. And finally, the mode-locked pulse output with repetition rate of 706 MHz is realized. At the pump power of 1.5 W, the mode-locked laser can achieve laser pulse with average output power of 260 mW and pulse duration of 158 fs. The laser can operate stably for 72 h under mode-locked condition, and its structure is more conducive to miniaturization and portability for high repetition frequency systems.

Key words lasers; fiber laser; nonlinear polarization rotation; repetition rate; gain fiber

OCIS codes 140.3510; 140.7090; 320.7080; 320.7160

1 引言

高重复频率光纤飞秒激光器由于输出光谱宽、脉宽窄、稳定性好、单位时间内脉冲序列多等优点, 已在高速光刻、天文光谱校准、高分辨率光梳光谱仪和太赫兹光谱仪等方面具有广泛的应用前景^[1-3]。因此, 高重复频率光纤飞秒激光器研究得到了广泛重视, 研究成果不断报道^[4-5]。实现高重复频率光纤激光锁模常有被动锁模与主动锁模两

种手段。然而由于主动锁模技术受到饱和吸收体工作带宽影响, 难以实现窄脉宽输出。被动锁模技术主要利用光纤非线性偏振旋转原理实现锁模, 即当一个脉冲的两正交偏振分量在光纤中传输时由自相位调制(SPM)和交叉相位调制(XPM)引起强度依赖的偏振变化, 配合偏振控制器产生一个具有自幅度调制作用的等效快速可饱和吸收体, 实现脉冲的窄化。在实际过程中一般通过采用高掺杂增益光纤并缩短腔长, 从而实现高重复频率脉冲激

收稿日期: 2020-08-24; 修回日期: 2020-10-01; 录用日期: 2020-10-12

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504400, 2018YFB0407100)

*E-mail: ye_zoom@126.com

光^[6-9]。线性腔光纤激光器的重复频率一般可以达 GHz,但是这种线性腔严重依赖慢饱和和吸收机制,限制了激光脉宽和输出功率,因此我们引入非线性偏振锁模机制,采用非线性环形腔,可以极大提高激光的基本重复频率,产生更短脉冲。由于激光脉冲的重复频率与非线性环线腔的长度成反比,因此可能需要不断地减少腔长,提高激光器的重复频率^[10-11]。

2007年,Wilken等^[12]通过非线性偏振旋转(NPR)锁模手段,搭建了250 MHz重复频率,近70 fs的掺镱光纤振荡器。上述光源已经成为Max-Planck研究所的Menlo System光学频率梳的光源。其后多种锁模技术进一步提升了高重复频率光纤飞秒激光器的重复频率。如2011年,Wang等^[13]利用设计的新颖波分复用器(Col-WDM)可以完全将腔内的单模非增益尾纤长度减少为零,将激光器的重复频率提高为503 MHz,光谱宽度为34 nm,156 fs的脉冲激光。2015年,刘欢等^[14]利用NPR原理技术在掺Er光纤激光器中获得重复频率为303 MHz,脉宽为90 fs的脉冲。2018年,Liu等^[15]通过非线性放大环形镜(NALM)锁模手段,实现脉宽为152 fs的高功率脉冲输出,重复频率为72 MHz。2019年,韦小乐等^[16]通过可饱和吸收体锁模手段,实现中心波长为1064 nm,重复频率为1.2 GHz,但输出脉宽依然在ps量级。放眼该领域,莫斯科大学、日本UEC大学、华南理工大学、中国科学院上海光学精密机械研究所、湖南大学等研究单位均在上述领域做出重大研究^[17-19]。虽然当前利用可饱和吸收体与高掺杂光纤可实现5 GHz以上的重复频率^[20],由于其光谱范围小,脉宽在ps量级,无法达到fs量级^[21]。同样对于NPR锁模技术,也有待进一步通过缩短腔长的手段实现更高重复频率的飞秒激光输出。当前,北京大学团队将光纤激光器的重复频率提高到1 GHz^[22],是目前基于NPR锁模技术实现的最高重复频率。另外华南理工大学团队,借助可饱和吸收体锁模实现12.5 GHz,1.9 ps重复频率激光^[23-24]。

本文采用集成度更高的“偏振分光器+法拉第旋转器”和空间长度更短的波片轴,利用NPR锁模原理,在掺镱光纤激光器中实现了最高重复频率为706 MHz被动锁模光纤飞秒激光器,脉冲宽度为158 fs,平均输出功率为260 mW的锁模脉冲。通过设计相应的温控系统、隔振系统进一步稳定该激光

器,并将其集成。最终上述该便携式激光器封装大小为20 cm×18 cm×10 cm,质量约为13 kg。该系统可于晴朗天气在室外常温环境中正常工作,稳定性良好。

2 实验装置

在被动锁模光纤激光激光器中实现高重复频率的脉冲输出主要困难是光纤组件的物理尺寸和有限的泵浦功率。要实现激光器的重复频率在500 MHz以上,不仅需要减少增益光纤的长度,更需要对自由空间部分进行优化,因此本文优化了两种新型器件“偏振分光器+法拉第旋转器”和波片轴。

为保证激光在环形腔的单向运转,常用的空间元件是光隔离器,然而它本身长度较长,例如,北京大学的张志刚团队在研究高重复频率光纤激光器中使用的光隔离器和偏振分光器的空间长度总达7 cm^[13]。因此本文优化了偏振分光器(PBS)+法拉第旋转器的一种新型组合器件(P-FR),取代了传统的光隔离器,既保证腔内激光的单向运转,又大大降低了激光器腔长。新型P-FR的原理图如图1所示,两个大小为5 mm的偏振分光器PBS分别置于长度为4.1 cm法拉第旋转器的输入口和输出口,利用辅助支架将两个PBS固定在法拉第旋转器的端口,两者之间几乎密合,P-FR总长度为5.1 cm。平行的激光(1030 nm)经过输入端的PBS后被分为两束,一束光作为激光器的输出,另一束光经过法拉第和输出端的PBS反射到腔内掺镱光纤中,形成闭合的环形腔。该P-FR同时结合了法拉第旋转器和偏振分束器的功能,即只允许一个方向的激光传输,保护腔内的器

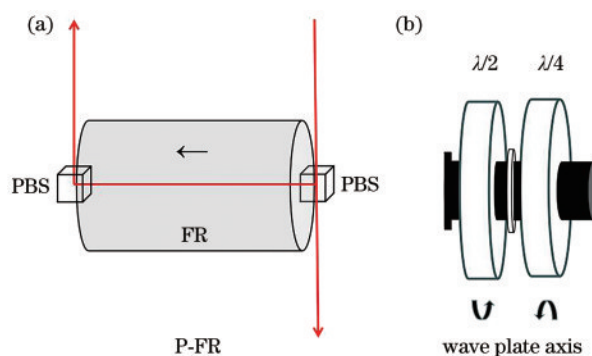


图1 新型P-FR的原理图。(a) P-FR; (b)波片轴
Fig. 1 Schematic diagram of new P-FR. (a) P-FR; (b) wave plate axis

件不会被回返光打坏。同时该 P-FR 物理尺寸很短,降低了激光在腔内运转的长度,提高激光器的脉冲重复频率。

此外,在传统的光纤激光器中,1/2 波片和 1/4 波片都是独立器件,每块波片安装尺寸最小厚度在 8 mm 左右。为了降低波片的安装座厚度,我们自制了波片轴,通过在波片中央钻孔将波片安装在可旋转的轴上。波片轴原理图如图 1 所示,以直径为 8 mm 在波片的中心打出圆孔,厚度为 2 mm 的波片安装在圆轴上,1 mm 厚的垫片将各波片隔开,整个波片轴的空间尺寸很短,两块波片加上垫片总长只有 5 mm。两个波片在激光系统中用于改变腔内脉冲的偏振状态,与波分复用准直器、光纤等共同构成一个类饱和吸收体被动锁模器件,完成激光器的锁模。同时波片可安装在波片轴上,大大降低波片之间的间距,提高了脉冲重复频率。

通过以上两种新型 P-FR 和波片轴,不仅改进了谐振腔器件的空间分布,而且缩短了耦合长度,从而提高了激光器的重复频率以及优化了整个腔型结构。

系统采用 NPR 锁模,其光路结构如图 2 所示。实验中,泵浦源采用 2 个 980 nm 半导体激光器双向泵浦,每个泵浦激光模块输出的最大

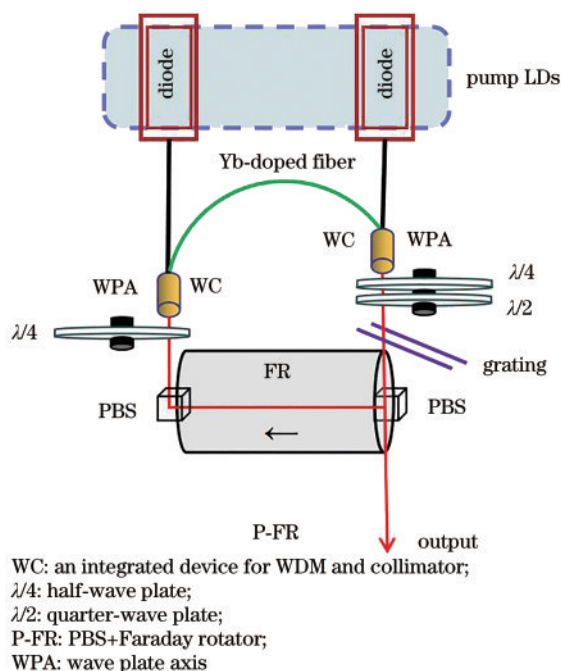


图 2 高重复频率掺镱光纤飞秒激光器结构图

Fig. 2 Schematic of high repetition rate Yb³⁺-doped fiber femtosecond laser

功率为 0.9 W。本文采用一种波分复用器与准直器的集成器件形成 Col-WDM^[15],从而减少不必要的空间结构。该 Col-WDM 在加工过程中,将传统的腔内单模光纤替换成增益光纤,使腔内只有增益光纤,不存在其他单模光纤与仪器尾纤,以此减少传统光纤激光系统中,仪器尾纤所占的空间。实验中,我们也利用了高集成度的“PBS+法拉第旋转器”结构,并且 1/2 波片与 1/4 波片一起安装在波片轴上,更进一步提高了谐振腔的紧凑性,减小空间长度。腔内采用一对 1250 line/mm 的透射式光栅提供负色散,补偿腔内器件与增益光纤带来的正色散,使锁模激光器工作在零色散点附近。整个自由空间长度共为 11 cm。

980 nm 泵浦激光^[25]通过 Col-WDM,导入到谐振腔中,在高掺杂增益光纤中构造粒子数反转,由光纤光到空间光,再从空间光回到光纤形成完整的光学回路。同时各个器件和光纤共同构成一个类饱和吸收体被动锁模器件,实现脉冲的窄化,以及高重复频率的飞秒脉冲输出。

3 实验结果与分析

脉冲在激光谐振腔中传输时会受到光纤色散、非线性效应、损耗等各种因素的影响。其中色散导致脉冲时域波形展宽,非线性效应中 SPM、XPM 使脉冲产生新的频率成分,引起光谱展宽,其对应时域波形的压缩。当腔内净色散与 SPM 对脉冲时域的调制作用达到平衡状态时,脉冲以孤子形式在谐振腔传输,脉冲形状和强度保持不变。当抽运功率不变时,随着增益光纤长度的减少,激光器腔内单脉冲能量下降,腔长的减小加上功率的减小,引起非线性相移减小,基于 NPR 的光纤激光器难以实现孤子锁模。为了满足实验要求,本文挑选具备高增益特性的掺镱光纤(CorActive SCF-Yb-4/125)来保证腔内有足够的非线性相移完成 NPR 锁模,该光纤群速度色散为 23 fs²/mm,其三阶色散为 130 fs³/mm,在 976 nm 处有最大 2500 dB/m 的吸收系数。增益光纤长度为 18 cm,光栅对的间距为 3 mm,总腔长 30 cm,腔内净色散约为 -5000 fs²。

由于非线性偏转锁模需要腔内非线性相移在 π 以上,且非线性相移随光纤长度的减小而减小,更短的腔长需要更强的腔内光场强度维持锁模状态。

因此在实验中,逐渐提高泵浦功率,在达到锁模阈值之后,调整激光器腔内偏振转状态,直到激光器产生长时间保持稳定状态的锁模激光脉冲。当两端输入的总泵浦功率为 1.8 W 时,掺镱光纤激光器在连续光运转下达到自启动阈值,通过调制旋转波片实现非线性偏转锁模。在锁模稳定后,可实现激光器的稳定运行,激光器可输出的最大功率为 260 mW,将泵浦功率降低到 1.5 W 来消除光谱中的连续光,以此优化脉冲光谱。当抽运光的功率在 1.5~1.8 W 之间时,激光器在每次重启后都可实现锁模的自启动运转,当抽运光的功率在 1.3~1.5 W 之间时,激光器不能够完成自启动,需要人为调制腔内偏振,改变腔内偏振状态完成锁模,从而使激光器稳定地输出脉冲激光。考虑到泵浦光耦合进 WDM 准直器的损耗,该激光系统最大拥有 17.4% 的转换率。

实验中采用型号为 N9000A 高分辨率频谱仪来监测脉冲序列,脉冲通过高速光电探测器后,连接到频谱仪上得到的输出脉冲的重复频率为 706 MHz,可以看出其频率间隔稳定,锁模状态良好,如图 3(a)所示。腔内激光脉冲在光克尔效应作用下,传输过程受光纤自相位调制,发生频谱展宽,激光器锁模后的光谱如图 3(b)所示,输出的光谱半峰全宽为 16 nm。图 3(c)为自相关仪器(APE)测得的高重复频率光纤飞秒激光器输出脉冲的自相关曲线,测得自相关曲线半峰全宽为 221 fs,采用高斯拟合可得实际脉冲宽度为 158 fs。由光谱图可得,激光谐振腔直接输出脉冲的光谱宽度较大,因此在系统外通过色散补偿装置的方式可将脉冲压缩到百飞秒之下。该高重复频率光纤飞秒激光器输出激光的光斑如图 3(d)所示,该 CCD 测得的光斑呈高斯状,表明光斑质量较好。

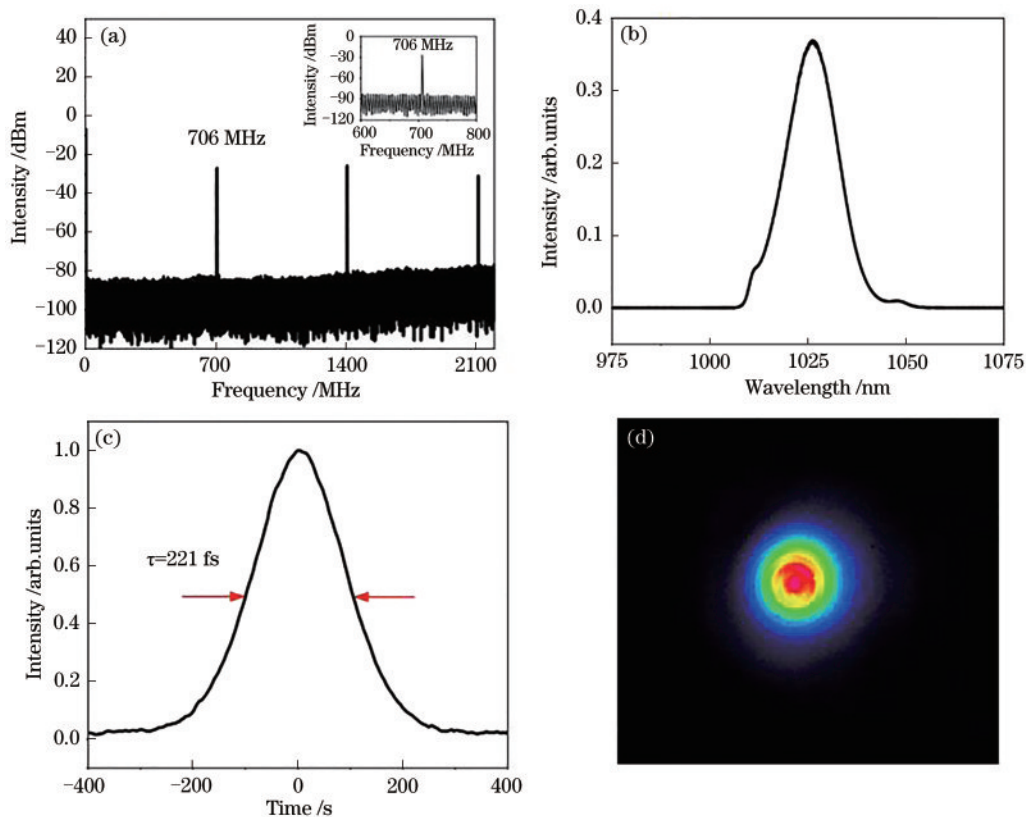


图 3 重复频率为 706 MHz 时光纤激光器各输出指标。(a) 脉冲重复频率;(b) 脉冲光谱;(c) 自相关曲线;(d) 输出光斑
Fig. 3 Each output index of 706 MHz repetition rate fiber laser. (a) Pulse repetition rate; (b) pulse spectrum; (c) auto-correlation curve; (d) laser spot

最后,我们监测了该激光器在 6 h 内工作稳定性情况,如图 4 所示。激光器在开始工作的前 1 h 内,由于谐振腔温度的升高,导致腔长改变引起输出功率略微下降。在激光器的温度稳定后的 5 h 内

谐振腔输出功率基本保持不变。利用标准差公式得出输出功率离散度为 0.067%,同时该激光器在实验室常温条件下连续 72 h 内稳定地输出激光脉冲。

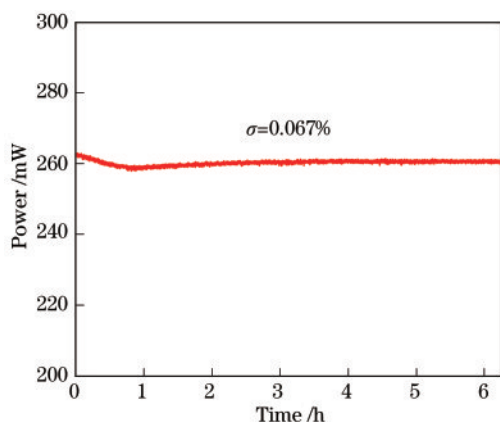


图 4 重复频率为 706 MHz 时光纤激光器输出功率

Fig. 4 Output power of 706 MHz repetition rate fiber laser

4 结 论

本文通过设计新型 P-FR 和波片轴, 不仅改进了谐振腔器件的空间分布, 而且缩短了耦合长度, 提高了激光器输出的重复频率以及优化了整个腔型结构。同时, 采用高增益系数的掺镱光纤, 通过减少激光器的腔长和提高泵浦功率, 最终将激光器的重复频率提高到 706 MHz, 光谱宽度为 16 nm, 实现了脉宽为 158 fs、平均功率为 260 mW 的飞秒脉冲输出。

参 考 文 献

- [1] Li C H, Benedick A J, Fendel P, et al. A laser frequency comb that enables radial velocity measurements with a precision of 1 cm/s^{-1} [J]. *Nature*, 2008, 452(7187): 610-612.
- [2] Ruppe J, Chen S Y, Zhou T, et al. Coherent pulse stacking extension of CPA to 9 ns effectively-long stretched pulse duration [C] // 2016 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), June 5-10, 2016. Washington D.C.: OSA, 2016: SM4I.2.
- [3] Kerse C, Kalaycıoğlu H, Elahi P, et al. Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses [J]. *Nature*, 2016, 537(7618): 84-88.
- [4] Wang T S, Ma W Z, Jia Q S, et al. Passively mode-locked fiber lasers based on nonlinearity at 2- μm band [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 1-11.
- [5] Jia Q S, Wang T S, Ma W Z, et al. Mode-locking thulium-doped fiber laser with 1.78-GHz repetition rate based on combination of nonlinear polarization rotation and semiconductor saturable absorber mirror [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 1-8.
- [6] He G L, Xu L, Jin L, et al. Double SESAM passively mode-locked ultrashort pulse fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(5): 0505002.
何广龙, 徐莉, 金亮, 等. 双 SESAM 被动锁模超短脉冲光纤激光器 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(5): 0505002.
- [7] Liu P, Wang T S, Zhang P, et al. Multi-wavelength thulium-doped mode-locking fiber laser based on nonlinear polarization rotation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(6): 0614003.
刘鹏, 王天枢, 张鹏, 等. 基于非线性偏振旋转效应的多波长掺铥锁模光纤激光器 [J]. *光子学报*, 2016, 45(6): 0614003.
- [8] Jia Q S, Wang T S, Ma W Z, et al. Passively harmonic mode-locked pulses in thulium-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(10): 106121.
- [9] Xu C Y, Jin L, Chen H L, et al. Narrow linewidth picosecond pulsed fiber lasers based on WS_2 saturable absorber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0101007.
徐成阳, 金亮, 陈华龙, 等. 基于 WS_2 可饱和吸收体的窄线宽皮秒脉冲光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 0101007.
- [10] Wang X F, Li Y, Zhu C, et al. All fiber passively mode-locked Yb-doped fiber laser with SESAM [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(11): 1319-1324.
王雄飞, 李尧, 朱辰, 等. 基于 SESAM 的全光纤被动锁模光纤激光器 [J]. *激光与红外*, 2015, 45(11): 1319-1324.
- [11] Liu H, Wang A M, Jiang L J, et al. Sub-30-fs pulse generation from dispersion-managed Yb: fiber ring laser incorporating solid-core photonic bandgap fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(6): 500-502.
- [12] Wilken T, Hänsch T W, Holzwarth R, et al. Low phase noise 250 MHz repetition rate fiber fs laser for frequency comb applications [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics 2007, May 6-11, 2007, Baltimore, Maryland, United States. Washington D.C.: OSA, 2007: CMR3.
- [13] Wang A M, Yang H Y, Zhang Z G, et al. 503 MHz repetition rate femtosecond Yb: fiber ring laser with an integrated WDM collimator [J]. *Optics Express*, 2011, 19(25): 25412-25417.
- [14] Liu H, Gong M L, Cao S Y, et al. A 303 MHz fundamental repetition rate femtosecond Er: fiber

- ring laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(11): 114210.
- 刘欢, 巩马理, 曹士英, 等. 303 MHz 高重复频率掺 Er 光纤飞秒激光器[J]. *物理学报*, 2015, 64(11): 114210.
- [15] Liu W, Shi H S, Cui J H, et al. Single-polarization large-mode-area fiber laser mode-locked with a nonlinear amplifying loop mirror[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(12): 2848-2851.
- [16] Wei X L, Wei H, Sheng Q, et al. Picosecond pulsed all-fiber Yb-doped laser with 1.2 GHz repetition rate [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48 (11): 1148015.
- 韦小乐, 魏淮, 盛泉, 等. 重复频率 1.2 GHz 皮秒脉冲全光纤掺镱激光器[J]. *光子学报*, 2019, 48 (11): 1148015.
- [17] Gu Q Y, Hou J, Cheng X A, et al. All-fiber passive mode-locked laser realized by semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(5): 655-659.
- 谷庆元, 侯静, 程湘爱, 等. 利用半导体可饱和吸收镜实现的全光纤被动锁模激光器[J]. *中国激光*, 2008, 35(5): 655-659.
- [18] Zhang P Z, Fan W, Wang X C, et al. Mode-locking and multiwavelength operation from all-fiber ytterbium doped laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(3): 0302001.
- 张攀政, 范薇, 汪小超, 等. 全光纤掺镱激光器实现锁模和多波长输出[J]. *中国激光*, 2011, 38(3): 0302001.
- [19] Xu H W, Yang H, Wen S C, et al. Tunable multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(9): 2272-2276.
- 徐慧文, 杨华, 文双春, 等. 基于非线性偏振旋转的可调谐多波长掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(9): 2272-2276.
- [20] Cheng H H, Wang W L, Zhou Y, et al. 5 GHz fundamental repetition rate, wavelength tunable, all-fiber passively mode-locked Yb-fiber laser[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27646-27651.
- [21] Xu H, Yuan S, Guo Z R, et al. Femtosecond red and near-infrared lasers due to cascaded-Raman-assisted four-wave mixing in a nonlinear Yb-doped fiber amplifier [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10 (2): 669.
- [22] Li C, Ma Y X, Gao X, et al. 1 GHz repetition rate femtosecond Yb: fiber laser for direct generation of carrier-envelope offset frequency[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(28): 8350-8353.
- [23] Wang W L, Lin W, Cheng H H, et al. Gain-guided soliton: scaling repetition rate of passively modelocked Yb-doped fiber lasers to 12.5 GHz [J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 10438-10448.
- [24] Zhou Y, Lin W, Cheng H H, et al. Composite filtering effect in a SESAM mode-locked fiber laser with a 3.2-GHz fundamental repetition rate: switchable states from single soliton to pulse bunch [J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10842-10857.
- [25] Wei W L, Ou P, Yan P, et al. Experimental study of 30 W CW fiber laser by two-end pumping [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(1): 5-8.
- 韦文楼, 欧攀, 闫平, 等. 双端抽运的 30W 光纤激光器实验研究[J]. *中国激光*, 2005, 32(1): 5-8.