

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2019-01-0001-06

基于混合锁模的掺铒光纤飞秒激光器研究^{*}

王璐丁^{1,2}, 张颜艳¹, 饶冰洁¹, 姜海峰¹, 张首刚¹

(1. 中国科学院 时间频率基准重点实验室, 西安 710600;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 研究了一种有效结合非线性偏振旋转效应(NPR)锁模和半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模的混合锁模掺铒光纤飞秒激光器。激光器系统输出脉冲的重复频率为 97.6 MHz, 光谱宽度 21.52 nm。直接输出脉冲宽度 168 fs, 激光器泵浦功率的转化效率为 12.2%。与单一机制锁模激光器相比, 自制混合激光器具有高性能的特点, 且锁模状态稳定, 可以实现自启动。该激光器为实用型光学频率梳的研制提供了稳定的光源。

关键词: 飞秒光纤激光器; 锁模激光器; 掺铒光纤; 混合锁模

Experimental study on hybrid femtosecond erbium-doped fiber laser

WANG Lu-ding^{1,2}, ZHANG Yan-yan¹, RAO Bing-jie¹, JIANG Hai-feng¹, ZHANG Shou-gang¹

(1. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: We demonstrate a hybrid mode-locked femtosecond fiber laser which incorporate both nonlinear polarization rotation effect (NPR) and semiconductor saturable absorption mirror (SESAM). The repetition rate of the laser is 97.6 MHz, the FWHM of the optical spectrum is 21.52 nm. The pulse duration is 168fs, and the pump-output power efficiency is 12.2%. The laser exhibits a high performance feature, meanwhile, shows a stable mode-locking and self-starting compared with single mode locking laser. These results indicate that the laser can provide a stable light source for the development of practical optical frequency comb.

Key words: femtosecond fiber laser; mode-locked laser; erbium-doped fiber; hybrid mode-locking

0 引言

20 世纪 80 年代以来, 由于对光纤研究的成熟和光纤制造技术的进步, 飞秒光纤激光器逐渐成为人们研究的热点, 并得到了迅速发展^[1-2]。与钛宝石飞秒激光器相比, 光纤飞秒激光器具有搭建成本低、体积较小、调谐简单等特点, 并且具有全光纤结构, 满足了实用型应用领域的需求。光纤激光器受环境扰动的影响较小, 更适合应用于环境扰动较大的应用环境中。20 世纪 90 年代初, 光纤通讯技术得到了迅速的发展, 掺铒光纤飞秒激光器因其工作波长处于光通信窗口、光谱易于扩展到其他波长, 且在元器件选取和成本上具有优势, 得到了全面、深入的研究^[3]。目前, 基于掺杂光纤的飞秒激光器被广泛用于飞秒光梳^[4]系统中, 作为系

^{*} 收稿日期: 2018-04-21; 接受日期: 2018-07-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91536217; 61127901)

作者简介: 王璐丁, 男, 硕士, 主要从事光学频率梳的研究。

统的光源和核心部件^[5]。飞秒激光器自身的性能、稳定性在一定程度上决定了光频梳系统的整体性能^[6]。

锁模技术是获得飞秒激光脉冲的常用方法,至今已有近四十年的发展历史。目前常用的锁模机制主要有非线性偏振旋转(NPR)和半导体可饱和吸收镜(SESAM)等。其中,NPR锁模应用得最为广泛,是基于非线性偏振旋转效应实现的^[7]。具体来说,脉冲在光纤中传输时,由于光纤中的非线性效应,将产生与强度相关的非线性相移。脉冲峰值处光强最强,经历的非线性作用强度最大,其偏振态旋转的程度最剧烈。经过 $1/2$ 波片和 $1/4$ 波片对偏振的筛选,就可以使脉冲的峰值部分无衰减地输出,实现脉冲的窄化。1992年,V. J. Matsas等首次利用NPR效应,获得了脉冲宽度1.55 ps,光谱宽度1.7 nm的锁模脉冲^[8]。NPR锁模机制具有快饱和吸收体的特点,输出脉冲宽度在飞秒量级,且时间抖动小,搭建成本低,在实验室内环境中得到了大量的应用^[9]。然而,NPR锁模容易受到环境干扰而导致偏振态漂移^[10],温度、振动以及应力等因素的变化都破坏锁模状态,锁模的启动依赖手动调节波片,偏振态设置的不同会形成锁模状态的差异,最终导致脉冲特征的变化,无法满足室外应用环境的需要,限制了飞秒光梳向实用化方向发展。

由于具有较高环境稳定性,SESAM锁模机制受到研究者广泛的关注^[11-12]。SESAM锁模的原理是光脉冲的边缘部分受到SESAM较大的吸收,而超过一定阈值的脉冲峰值部分则无损耗地反射,从而实现脉冲的窄化^[13]。1998年,M. J. Hayduk等首次报道了SESAM锁模的光纤激光器,输出脉冲重复频率4.1 MHz、脉冲宽度12 ps^[14]。SESAM激光器谐振腔结构简单,锁模状态受环境影响较小,且可以长期稳定地运行,具有较高的稳定性,在实用化研究中得到较多的应用^[15-16]。然而,SESAM是一种慢饱和吸收体,与NPR机制相比,SESAM锁模输出脉冲较宽,并伴随有较高的频率噪声水平^[17]。

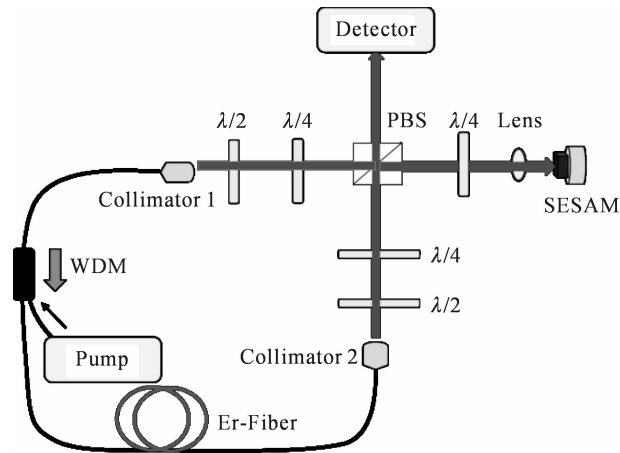
通过上文的分析,NPR锁模机制在输出脉冲性能方面有突出的优势,缺点是易受环境的干扰而影响腔内偏振态,从而导致失锁。SESAM机制易于实现自启动,且锁模稳定,但输出脉冲性能较差。通过将这两种锁模机制结合起来,混合锁模光纤激光器就可以兼具高性能和高环境稳定性的特点。一种实现方式是将SESAM置于NPR环形谐振腔中,锁模脉冲的形成靠NPR主导,起到脉冲整形的作用,SESAM用来维持激光器的自启动和稳定锁模。其优势在于系统既具有稳定锁模的特点,运行状态受环境影响小,同时能够输出的低噪声水平、窄脉宽的超短脉冲。这对于满足实用型光梳系统的研制需求显得至关重要。2009年,H. Byun等首次报道了NPR和SESAM混合锁模激光器,输出脉冲的重复频率为234 MHz,光谱宽度为35.8 nm,脉冲宽度为102 fs^[18]。之后,J. L. Morse等实现了重复频率301 MHz,光谱宽度21.5 nm,脉冲宽度108 fs的脉冲输出^[19]。2012年,S. Kim等采用光纤耦合注入泵浦的方式实现了输出功率156 mW,光谱宽度42 nm,脉冲宽度146 fs的脉冲输出^[20]。

国内对混合锁模光纤激光器的研究与国际基本同步,研究单位主要有中科院光电院、上海交通大学、华中科技大学等单位。上海交通大学2014年报道了结合NPR和SESAM的光纤激光器,重复频率为212 MHz,输出脉冲41.9 fs,光谱宽度61.4 nm,转换效率11.3%,其性能指标达到了国际先进水平^[21],然而,系统的稳定性较低,且未实现集成化,无法应用于室外环境。中科院光电院2016年报道了一台混合锁模激光器,重复频率为60.72 MHz,脉冲宽度542 fs,光谱宽度14.6 nm,转换效率4.2%^[21],能较好地满足实用化研究的需求,然而输出脉冲较宽,且系统体积较大。

为了满足实用型飞秒光梳对高性能、高稳定性激光光源的研制需求,本文搭建了一台NPR和SESAM混合锁模的飞秒光纤激光器。NPR效应用来对超短脉冲整形,在锁模过程中起主要作用;可饱和吸收体的作用是实现自启动和稳定锁模。自制激光器结合了两种锁模方式优点,光路结构紧凑、集成化程度高。结果显示,混合锁模激光器系统具有自启动锁模功能,光谱宽度21.52 nm,重复频率为97.6 MHz,脉冲宽度为168 fs,泵浦输出转换效率12.2%。该激光器满足了后续实用型、高鲁棒性型光学频率梳搭建的需要。

1 实验装置

图1是混合锁模光纤飞秒激光器实验装置示意图。激光器的谐振腔为环形腔,由95 cm光纤和25 cm自由空间器件组成。表1列出了腔内光纤的类型、长度、色散和非线性系数。掺铒光纤作为增益光纤,SMF28光纤主要是波分复用器(WDM)和准直器(Collimator)的尾端光纤。



注: $\lambda/2$ 为半波片; $\lambda/4$ 为 1/4 波片;PBS 为偏振分束器;Lens 为聚焦透镜;Collimator 为准直器;SESAM 为可饱和吸收体;WDM 为波分复用器;Er-Fiber 为掺铒光纤;Pump 为泵浦激光器;Detector 为探测器

图 1 混合锁模飞秒光纤激光器实验结构示意图

表 1 激光器各类型光纤长度及参数

光纤类型	长度/cm	色散系数/(ps/nm/km)	非线性系数/(W^{-1}/m)
Liekki ER110-4/125	40	-26	0.003 2
SMF28	55	+17	0.001 2

自由空间器件包括偏振分束器(PBS)、10 mm 焦距的聚焦透镜(Lens)、SESAM 以及 3 个 1/4 波片($\lambda/4$)和 2 个 1/2 波片($\lambda/2$)、2 个光纤准直器(Collimator 1、Collimator 2)和压电陶瓷(PZT)。PBS 的作用是 NPR 环路的起偏器和激光器输出的耦合器;Lens 用于将光聚焦到 SESAM 表面,从而达到起锁阈值功率;波片用于优化腔内激光的偏振态,进而控制 PBS 的输出激光功率。实验采用 BATOP SAM-1550-8-2ps-x 型 SESAM 器件,调制深度为 5%,吸收率为 8%,饱和通量为 $50 \mu J/cm^2$,饱和恢复时间为 2 ps。SESAM 上的聚焦光斑直径约为 $15 \mu m$ 。激光器采用后向泵浦方式,泵浦光源为 LDC-3908 高功率半导体激光器(LD),其中心波长为 980 nm。泵浦功率可由两个 thorlabs 电流控制器调节,最大控制电流 1 200 mA,合束后最大输出功率为 1 300 mW。Collimator 2 输出的光经过 PBS,水平偏振光作为激光器的输出,垂直偏振光进入到环路的线性臂部分,通过 $\lambda/4$ 波片和 Lens 后打到 SESAM 表面。SESAM 后端紧贴 PZT,目的是通过反馈控制激光器的腔长,实现重复频率的锁定。光经过 SESAM 反射回来,第 2 次经过 $\lambda/4$ 波片,偏振态由垂直偏振转化为水平偏振,经 PBS 透射后,经波片组的偏振态旋转后,由 Collimator 1 耦合进光纤环路中。当偏振调节器件(波片组)的偏振主轴与脉冲中部偏振态一致时,脉冲强度高的中心部分透过,而强度低的边缘部分被吸收,使脉冲在光学腔内不断窄化,最终实现锁模脉冲输出。

实验中,激光器输出功率由功率计 Thorlabs PM100D 来测量;输出光谱由光谱仪 YOKOGAWA AQ6370C 检测;输出脉冲的宽度由自相关仪 Femtochrome Research FR-103WS 来检测;输出脉冲通过光电探测器 EOTET-3000A 后,利用频谱分析仪 Anritsu MS2692A 来检测其射频谱。最后用动态信号分析仪测量了激光器的幅度噪声。

2 实验结果与讨论

首先,将两个电流控制器均设为 1 100 mA,通过配合调节谐振腔内 4 个波片角度,激光受到 NPR 效应和 SESAM 的共同调制,锁模状态很容易建立。图 2 是用光谱仪 Yokogawa AQ6370C 得到的光谱曲线。光谱仪分辨率为 0.02 nm,波长的覆盖范围为 1 500~1 630 nm。降低两个泵浦电流为 900 mA 时,光谱中心波长为 1 568.3 nm,光谱宽度为 23.2 nm。泵浦电流为 700 mA 时,光谱中心波长为 1 570.9 nm,宽度为 25.6 nm。

继续降低泵浦电流至 500 mA, 光谱中心波长 1 566.7 nm, 光谱宽度为 25.3 nm。由光谱图可以发现, 随着泵浦功率的改变, 中心波长和光谱宽度无明显变化, 光谱形状基本不变。

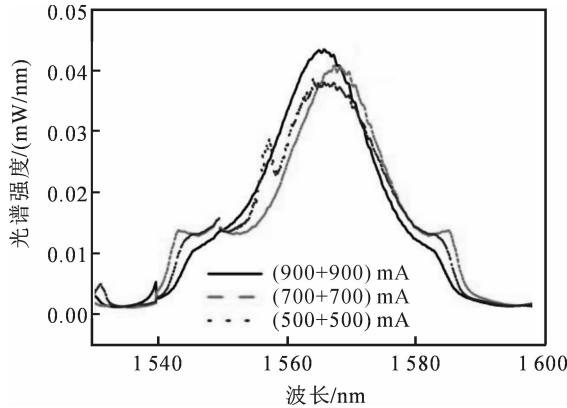


图 2 飞秒激光器输出的光谱

图 3(a)给出了激光器输出功率随泵浦功率的变化情况。经过数据拟合, 锁模脉冲的功率随泵浦功率呈线性关系, 转换效率约为 12.2%, 高于与此前国内报道的同类型混合锁模激光器^[21-22], 这是因为光路各部分耦合程度较高。高转换效率激光器延长了泵浦激光管的使用寿命, 增强了系统的可靠性。激光器锁模阈值功率为 450 mW, 低于阈值功率, 激光器无法锁模。提升泵浦功率, 激光器可以自启动进入锁模状态。

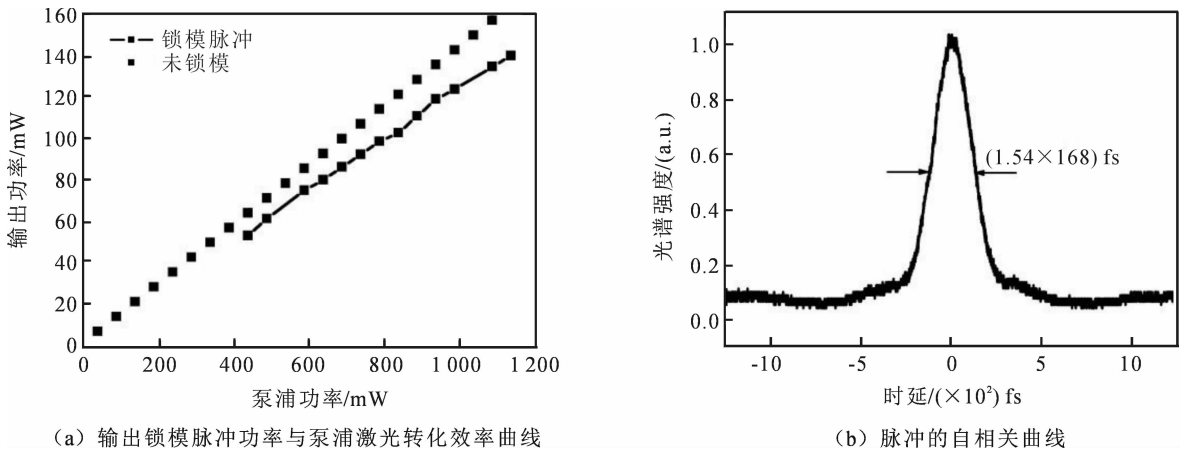


图 3 输出锁模脉冲功率与泵浦激光转化效率曲线和脉冲的自相关曲线

图 3(b)是用自相关仪 Femtochrome Research FR-103WS 得到的脉冲自相关曲线。由于脉冲形状为双曲正割型, 脉宽与自相关曲线宽度的系数为 1.54²³, 经计算, 输出脉冲的宽度为 168 fs, 大于傅立叶变换极限脉冲^[24]宽度 119 fs, 这是因为光纤色散引起了脉冲时域展宽。改变泵浦激光功率, 脉冲宽度未发现明显变化。

图 4(a)和(b)给出了激光器的输出光通过光电探测器 EOT-3000A 后, 由频谱分析仪 Anritsu MS2692A 测量得到的射频频谱, 此时的泵浦功率为 580 mW。图 4(a)的频率范围为 0~1 GHz, 分辨率带宽为 2 MHz, 测得激光器重复频率约为 97.6 MHz, 对应脉冲间隔 10.25 ns。锁模激光器输出脉冲频谱各谐波排列整齐, 频谱幅度基本相同, 这表明混合锁模激光器此时处在稳定状态, 未出现多脉冲或调 Q 锁模的情形。

图 4(b)是输出脉冲基频的频谱, 频率范围是 97~98 MHz, 分辨率带宽为 4 kHz。从图中发现, 脉冲频谱的基频信噪抑制比大于 35 dB, 且在 1 MHz 频率范围内未发现其他的边带。

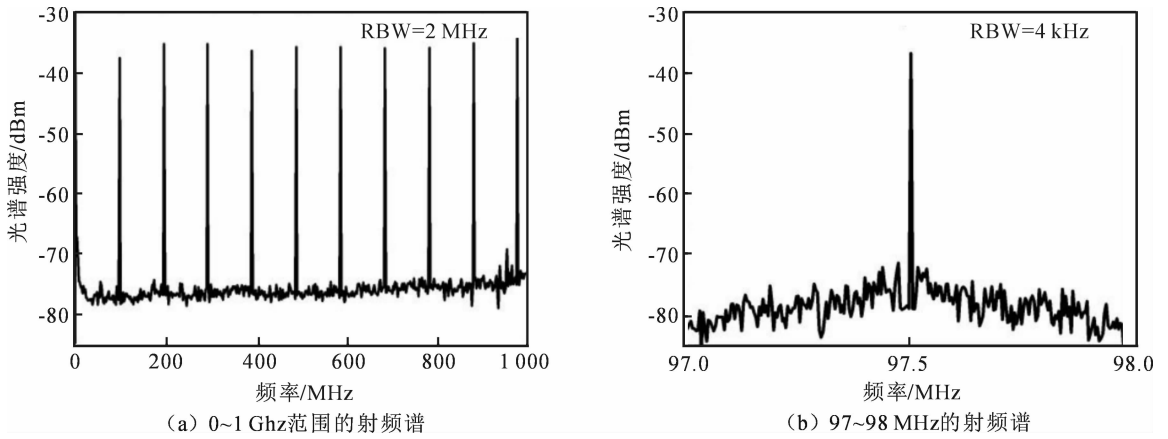


图 4 1 GHz 范围和 1 MHz 范围的射频谱

为了测试自制激光器的噪声性能,用动态信号分析仪 SR785 分析了激光器的相对强度噪声,如图 5 所示。测试方法是:首先将输出光接入光电探测器 EOT-3000A,光电探测器带宽 2 GHz。再用动态信号分析仪测量双边带噪声功率谱。在 0.1~100 kHz 范围内,相对强度噪声稳定在 -120 dBc/Hz 左右。由于激光器的幅度噪声可以转换为相位噪声,较小的幅度噪声水平至关重要。混合锁模激光器锁模状态稳定,因此幅度噪声水平较低。

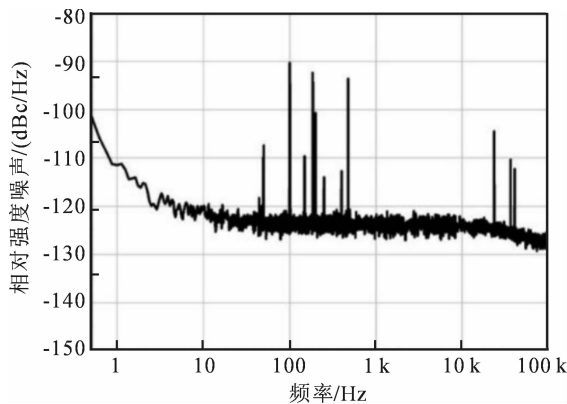


图 5 激光器自由运转时幅度噪声的功率谱密度

3 结论

本文报道了一台自主研发的混合锁模掺铒光纤飞秒激光器,并研究了输出脉冲的特性。该激光器结合了 NPR 和 SESAM 两种锁模方式,其中 NPR 部分的作用是整形脉冲,SESAM 部分的作用是稳定锁模和自启动。输出脉冲重复频率为 97.6 MHz,输出脉冲光谱中心波长为 1 556.44 nm,光谱宽度 21.52 nm,脉冲宽度为 168 fs。泵浦光功率 560 mW 时,输出功率 68.8 mW。输出光功率与泵浦光功率转换效率 12.2%。自制飞秒锁模光纤激光器为后续实用型光学频率梳的搭建提供了高可靠的光源。

参考文献:

- [1] SINCLAIR L C, CODDINGTON I, SWANN W C, et al. Operation of an optically coherent frequency comb outside the metrology lab[J]. Optics Express, 2014, 22(6): 6996-7006.
- [2] LIN G R, PAN C L, LIN Y T. Self-steepening of prechirped amplified and compressed 29-fs fiber laser pulse in large-mode-area erbium-doped fiber amplifier[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(11): 3597-3601.

- [3] IPPEN E P, HAUS H A, TAMURA K, et al. 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(13): 1080-1082.
- [4] INABA H, DAIMON Y, HONG F L, et al. Long-term measurement of optical frequencies using a simple, robust and low-noise fiber based frequency comb[J]. *Optics Express*, 2006, 14(12): 5223-5231.
- [5] BAUMANN E, GIORGETTA F R, NICHOLSON J W, et al. High-performance, vibration-immune, fiber-laser frequency comb[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(5): 638-640.
- [6] CUNDIFF S T, YE J. Femtosecond optical frequency combs[J]. *Review of Modern Physics*, 2003, 75(1): 325-342.
- [7] BRABEC T, KRAUSZ F. Intense few-cycle laser fields: frontiers of nonlinear optics[J]. *Review of Modern Physics*, 2000, 72(72): 545-591.
- [8] MATSAS V J, NEWSON T P. Self-starting passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarisation rotation[J]. *Optics Communications*, 1992, 28(15): 1391-1393.
- [9] GOBERT O, ROVERA D, MENNERAT G, et al. Linear electro optic effect for high repetition rate carrier envelope phase control of ultra short laser pulses[J]. *Applied Sciences*, 2013, 3(1): 168-188.
- [10] FERMAN M E, ANDREJCO M J, SILBERBERG Y, et al. Generation of pulses shorter than 200 fs from a passively mode-locked Er fiber laser[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(1): 48-50.
- [11] VAZQUEZZUNIGA L A, JEONG Y. Wavelength-tunable, passively mode-locked erbium-doped fiber master-oscillator incorporating a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2013, 17(2): 117-129.
- [12] GRUDININ A B, RICHARDSON D J, PAYNE D N. Passive harmonic mode-locking of a fibre soliton ring laser[J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(21): 1860-1861.
- [13] SCHIBLI T R, MINOSHIMA K, HONG F L, et al. Frequency metrology with a turnkey all-fiber system[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(21): 2467-2469.
- [14] PIRICH A R, PARKER M A. Photonic processing technology and applications II[M]. *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*, 1998.
- [15] HARTL I, DONG L, FERMAN M E, et al. Long-term carrier envelope phase locking of a PM fiber frequency comb source[C]//*Optical Fiber Communication Conference*. California: Technical Digest, 2005.
- [16] ZOU F, WANG Z K, WANG Z W, et al. Widely tunable all-fiber SESAM mode-locked Ytterbium laser with a linear cavity[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 92(1): 133-137.
- [17] TAUSER F, LEITENSTORFER A, ZINTH W. Amplified femtosecond pulses from an Er: fiber system: nonlinear pulse shortening and self-referencing detection of the carrier-envelope phase evolution[J]. *Optics Express*, 2003, 11(6): 594-600.
- [18] BYUN H, SICKLER J W, MORSE J L, et al. Femtosecond passively mode-locked fiber lasers using saturable Bragg reflectors[M]. *Ultrafast Phenomena XVI*. Springer: Berlin Heidelberg, 2010: 768-770.
- [19] MORSE J L, SICKLER J W, CHEN J, et al. High repetition rate, high average power, femtosecond Erbium fiber ring laser[C]//*2009 and 2009 Conference on Quantum Electronics and Laser Science Conference*. Baltimore: Lasers and Electro-Optics, 2009.
- [20] KIM S, KIM Y, PARK J, et al. Hybrid mode-locked Er-doped fiber femtosecond oscillator with 156 mW output power[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15054-15060.
- [21] LI X, ZOU W, CHEN J. 41.9 fs hybridly mode-locked Er-doped fiber laser at 212 MHz repetition rate[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(6): 1553-1556.
- [22] 黎尧, 纪荣祚, 石俊凯, 等. 双向运转混合锁模掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 21-25.
- [23] 王兆华, 魏志义, 张杰. 飞秒脉冲测量技术[J]. *物理*, 2002, 31(10): 659-666.
- [24] LEFORT C, MANSUR YAN T, LOURADOUR F, et al. Pulse compression and fiber delivery of 45 fs Fourier transform limited pulses at 830 nm[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(2): 292-294.