

doi: 10.3788/gzxb20164504.0414002

高功率线偏振皮秒脉冲簇 Yb 光纤激光器

魏凯华^{1,2}, 陈庆光¹, 温如华², 赖小敏¹

(1 杭州电子科技大学 生命信息与仪器工程学院, 杭州 310018)

(2 浙江大学 光电学院 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 以一个增益调制的分布式布拉格反射结构的半导体激光器为种子源, 设计了一个高功率皮秒脉冲簇输出的线偏振掺镱光纤激光器. 种子源输出脉冲宽度 200 ps, 重复频率 350 MHz. 在预放大中插入一个基于一级衍射透过的声光调制器实现了皮秒脉冲簇形式的激光输出, 脉冲簇的重复频率在 10~500 kHz 范围可调. 皮秒脉冲簇激光通过一个基于大模场面积保偏 Yb 光纤的功率放大级, 获得了高功率线偏振激光输出, 平均功率 83 W, 偏振消光比优于 15 dB. 当脉冲簇重复频率固定在 100 kHz, 脉冲簇中同时存在 350 个子脉冲时, 获得峰值功率 12 kW 的皮秒激光输出. 与传统连续脉冲输出的激光器相比, 该系统能够实现脉冲簇的输出, 有利于峰值功率的进一步提高, 可应用于激光微加工领域.

关键词: 光纤激光器; 皮秒脉冲; 脉冲簇; 掺镱光纤; 半导体激光器; 线偏振; 放大

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)04-0414002-5

High Power Linearly Polarized Yb Fiber Laser with Picosecond Pulse Bunch Output

WEI Kai-hua^{1,2}, CHEN Qing-guang¹, WEN Ru-hua², LAI Xiao-min¹

(College of Life Information Science & Instrument Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A high power linearly polarized Yb fiber laser with picosecond pulse bunch output was designed based on the seed consisting of a gain-switched distributed Bragg reflector structured laser diode, which emitted the picosecond pulses with a pulse duration of 200 ps and a repetition rate of 350 MHz. During pre-amplifying, a first-order diffraction transmission acousto-optic modulator was used to generate the picosecond pulse bunches, and the repetition rate of the bunches was tunable from 10 kHz to 500 kHz. The picosecond pulse bunch laser was power-amplified using a large mode area polarization maintaining Yb-doped fiber. A high power linearly polarized laser was obtained with an average power of 83 W, a peak power of 12 kW, and an extinction ratio of better than 15 dB. The peak power of 12 kW was obtained under the 100 kHz repetition rate of the pulse bunch, which was composed of 350 sub-pulses. Compared with the conventional continuous wave pulsed lasers, the pulse bunches were able to be obtained by this system, which benefited the further increase of the peak power. This system can be applied to the area of laser micro-machining.

Key words: Fiber lasers; Picosecond pulses; Pulse bunch; Yb-doped fiber; Laser diode; Linear polarization; Amplification

OCIS Codes: 140.3510; 140.3460; 060.2380; 060.2420; 060.3510

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61405050, 11304070)、浙江省自然科学基金(No. LQ16F050002)和浙江省教育厅一般科研项目(No. Y201533689)资助

第一作者: 魏凯华(1984-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为光电子激光技术. Email: weikaihua@hdu.edu.cn

通讯作者: 赖小敏(1987-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为生物光子学. Email: laixiaomin@hdu.edu.cn

收稿日期: 2015-09-08; 录用日期: 2015-12-25

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

0 引言

脉冲光纤激光器具有光束质量好、峰值功率高、热管理方便等特点,已被应用于光纤通信、生物医疗、激光打标和泵浦光参量振荡器(Optical Parametric Oscillator, OPO)等重要领域^[1-4]. 与纳秒脉冲激光相比,皮秒脉冲激光具有更高的峰值功率、更短的脉冲持续时间^[5-7],这些优势有利于实现高质量的激光微加工、无损的软组织手术、高效率的OPO运作.

目前,利用光纤激光器产生皮秒脉冲激光的主要方式有:8字锁模^[8]、非线性偏振旋转(Nonlinear Polarization Rotation, NPR)锁模^[9]、半导体饱和吸收镜(Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM)锁模^[10],还有一种方式是基于增益调制技术的半导体激光器(Laser Diode, LD). 8字锁模和NPR锁模技术能够产生几十皮秒到几百皮秒的激光输出,它们的缺点是自启动困难、重频难以调节,而且光谱宽度很宽,不利于泵浦OPO. SESAM锁模光纤激光器能够输出较窄的线宽,但是这种锁模方式仍然难以调节重频,并且由于SESAM不是光纤耦合器件,破坏了全光纤结构. 相比之下,增益调制的LD结构紧凑,而且具有重复频率可调的特点,是紧凑的高功率光纤激光器种子源的理想选择.

皮秒种子源能够通过主振荡功率放大(Master Oscillator Power Amplification, MOPA)的方式实现高功率的激光输出. 但是,这种MOPA结构的光纤激光放大器存在一个缺陷,即较高的峰值功率容易产生受激喇曼散射(Stimulated Raman Scattering, SRS)等非线性效应,限制了平均功率的进一步提高^[11-12]. 研究人员为了获得较高平均功率的输出,往往采用较高重复频率的种子源,或者将种子源进行脉冲倍增. 2005年, Ilday等^[13]利用一个基于NPR技术的Yb光纤激光器实现了高重复频率的皮秒脉冲激光输出,重频达到200 MHz. 2012年, Yang等^[14]同样利用NPR技术,实现了重频605 MHz、脉宽502 fs的超短脉冲激光输出. 在2006年, Zhao等^[15]提出了一种新型的全光纤化的脉冲重复频率倍增器,利用两个级联的光纤耦合器实现了重频从5.68 MHz到22.8 MHz的倍增. 高重复频率的皮秒种子源通过光纤激光放大器能够实现高平均功率的激光输出,但是此时的峰值功率就受到了限制.

为此,本文提出一种脉冲簇输出的皮秒光纤激光器,实现了高平均功率下的高峰值功率输出. 采用的种子源是一个结构紧凑的(Distributed Bragg Reflector, DBR)半导体激光器,能够实现350 MHz重频、200 ps脉宽的激光输出. 种子激光将通过三级放大,实现高功率的激光输出. 其中,在第二级放大中,

插入了一个基于一级衍射的声光调制器(Acousto-Optic Modulator, AOM),获得了脉冲簇形式的激光序列. 脉冲簇激光通过保偏光纤放大器获得了线偏振的高功率皮秒脉冲激光输出.

1 皮秒脉冲簇光纤激光器系统

高功率皮秒脉冲簇光纤激光器的系统构架如图1所示,种子源是一个带单模尾纤(尺寸6/125 μm)的DBR半导体激光器,一个带宽为10 GHz的任意波形发生器(Arbitrary Waveform Generator, AWG)通过一个快速的驱动电路控制LD输出的脉冲宽度和重复频率. 为了防止后续激光放大系统对种子源稳定性的影响,两个级联的光纤隔离器(ISO₁和ISO₂)被焊接在种子源尾纤之后,每个ISO的插入损耗均为0.7 dB.

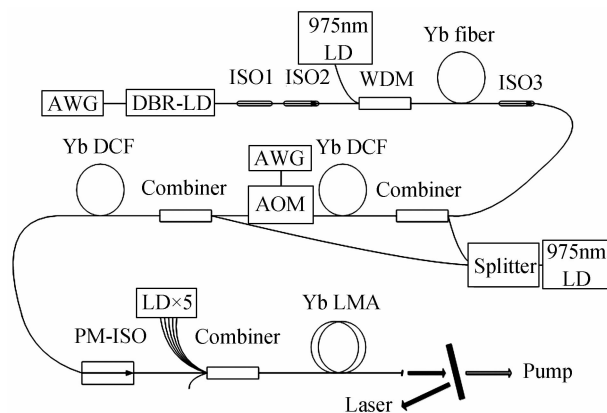


图1 皮秒脉冲簇光纤激光器系统构架

Fig. 1 Setup of picosecond pulsed fiber laser with bunches output

隔离后的种子激光通过三级光纤激光放大级实现高功率的线偏振输出. 由于种子激光经过2个光纤隔离器后功率下降明显,因此第一级放大采用增益较高的芯泵方式进行放大. ISO₂的输出端光纤与一个980 nm/1 064 nm波分复用器(Wavelength Division Multiplexer, WDM)的信号端相连,一个最大输出功率为0.8 W的单模975 nm LD,通过连接WDM的泵浦端激励一段长度为1 m的自制Yb光纤,尺寸为7/125 μm . 芯泵放大级之后连接了一个插入损耗为0.9 dB的光纤隔离器ISO₃, ISO₃的输出端光纤与一个多模合束器的信号端光纤相连接,合束器的信号端和泵浦端光纤尺寸分别为6/125 μm 和105/125 μm . 该级的泵浦源是一个最大功率为10 W的多模975 nm LD,它的尾纤尺寸为105/125 μm . 10 W的LD通过一个分束比为40/60的多模分束器同时泵浦两段相同长度的自制Yb双包层光纤(长度均为5 m),增益光纤的纤芯和内包层直径分别为7 μm 和125 μm ,在975 nm处的包层吸收为3 dB/m. 在第二级放大中插入了一个基于一级衍射透过的AOM,它的作用是实现皮秒脉冲簇输出,并且能够通过AWG控制开关的时间和频率,

以实现脉冲激光重频和脉冲簇宽度可调的目的. 第三级是功率放大级,采用包层泵浦方式,5个串联的由北京凯普林(BWT)公司生产的915 nm LD通过一个 $(6+1)\times 1$ 的保偏合束器(ITF公司)泵浦一段5 m长的增益光纤,每个LD的最大输出功率为25 W,尾纤尺寸均为 $105/125\ \mu\text{m}$,它们被固定在一块通水的铝板上进行散热. 为了提高光束质量,增益光纤采用一段5 m长的大模场面积(Large-Mode-Area, LMA) Yb 光纤,它尺寸为 $25/250\ \mu\text{m}$,在920 nm处包层吸收为2.3 dB/m,芯层和内包层的数值孔径分别为0.07和0.46. 功率放大级输出的激光特性通过一个双色镜滤除泵浦光后进行测量.

2 实验结果和讨论

实验中使用 ANDO 生产的型号为 AQ6317C 的光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzers, OSA)进行光谱测量,它的分辨率为0.02 nm;使用北京康冠生产的 InGaAs 高速探测器(带宽11 GHz)和 Tektronix 生产的型号为 DSA71254 的数字示波器(带宽12.5 GHz,采样率50 GS/s)进行脉冲特性测量.

实验中利用 AWG 控制 DBR 激光器输出的脉冲宽度和重复频率,由于驱动电路响应速度的限制,最窄的脉冲宽度为200 ps. 在稳定工作条件下,最高的脉冲重频为350 MHz. 由图2(a)可见,在350 MHz重频条件下,DBR激光器的输出中心波长为1063.8 nm,光谱的3 dB带宽为0.08 nm,光谱较为平滑,没有跳模现

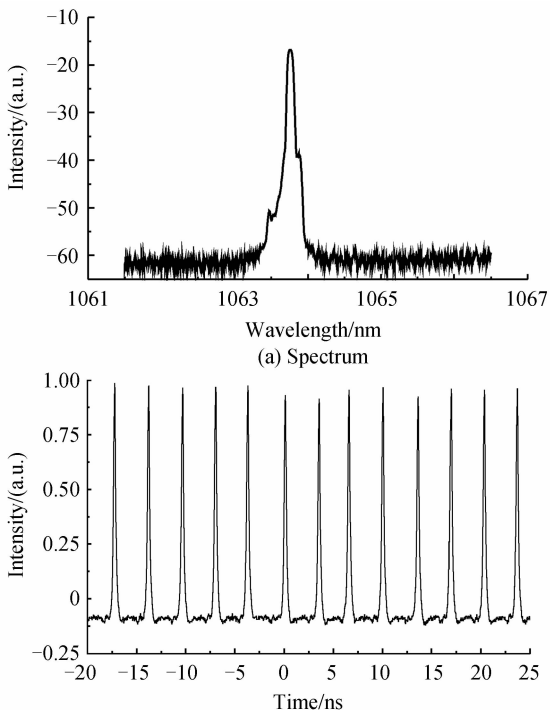


图2 350 MHz工作时DBR激光器输出的光谱和脉冲序列
Fig.2 Spectrum and pulse train from DBR laser diode at a repetition rate of 350 MHz

象. 由图2(b)可见,在350 MHz重频条件下,DBR激光器能够输出稳定的脉冲序列,每个脉冲的高度基本相同,脉冲之间的时间间隔同为2.86 ns,正好对应AWG的工作重频350 MHz.

350 MHz重频工作时,DBR激光器的功率为1.3 mW,经过两个非保偏的光纤隔离器后功率下降到0.6 mW. 采用芯泵方式,0.6 mW的激光被放大至9 mW,此时的光谱如图3. 由图可见,经过芯泵放大级后信噪比变差,这是由于信号光较小(0.6 mW),导致了较强的放大受激辐射(Amplify Stimulated Radiation, ASE),但是它的信噪比仍然在一个可接受范围内,不会对后续的放大造成影响. 另外,放大后的光谱3 dB宽度有所展宽(0.1 nm),这同样是由于ASE造成的.

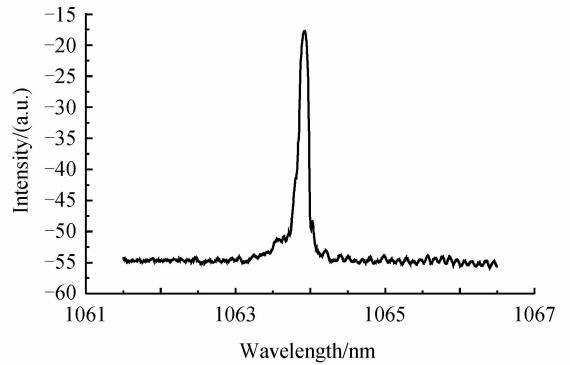


图3 经过芯泵放大后的皮秒脉冲激光光谱

Fig.3 Spectrum of the core-pumped picosecond pulsed laser

芯泵放大后的激光经过一个非保偏的光纤ISO,进入一个带脉冲选择功能的包层放大级. 这一级的基本原理是信号激光通过一段自制的Yb光纤进行预放大,连续的激光脉冲通过一个基于1级选单的AOM实现脉冲簇的输出,此时激光的功率会有所下降,因此让脉冲簇再通过一段Yb光纤进行放大. 值得注意的是,在实验中采用了1级衍射透过方式工作的AOM作为选单器件,其优点如下:普通的基于0级透过方式工作的AOM,在AOM关闭的情况下,仍然有20%至30%能量的脉冲激光透过,这部分的脉冲也会在后续系统中被放大,而放大时部分的泵浦能量就会被这部分脉冲消耗,不利于提高脉冲簇的放大效率,相比之下,1级工作的AOM会将不期望的脉冲全部隔离,实现了系统的优化.

图4为第二级预放大后测量的光谱图,其中实线表示未利用AOM选单但经过放大时的光谱,虚线表示利用AOM选单并放大后的光谱. 由图可见,两种情况下的光谱都较为平滑,但是它们的光谱形状和光谱宽度存在差异. 在未经AOM选单的情况下,光谱的3 dB带宽为0.1 nm,与上一级芯泵放大后的带宽相同. 而在选单后,光谱的3 dB带宽明显展宽,宽度为

0.13 nm,造成光谱展宽的主要原因是选单后单个周期内的脉冲个数变少,导致了能量都集中在脉冲簇的子脉冲中,此时子脉冲的峰值功率变高,引起了自相位调制(SPM)效应.虽然选单后光谱有所展宽,但并不会影响后续的实验研究工作.

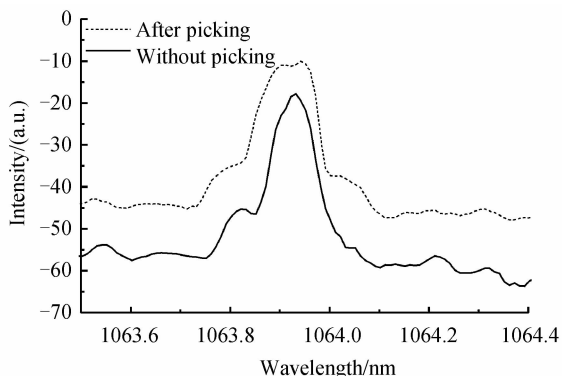


图4 经过选单和未经选单的第二级预放大后的光谱对比图
Fig. 4 Comparison between the spectra with and without picking through two stage amplification

在第二级预放大中,利用 AWG 控制 AOM 进行选单,采用不同的脉冲重复频率和占空比进行实验,并实现了重复频率和脉冲簇宽度的灵活调谐.图5为重复频率 100 kHz、占空比 10% 工作时的脉冲序列和脉冲簇形状图.由图可见,第二级放大之后具有稳定的脉冲序列,每个脉冲簇的高度几乎相同,脉冲簇之间的时间间隔同为 10 μ s,对应声光调制器的开关频率 100 kHz.单个脉冲簇的宽度为 1 μ s,对应占空比 10%,脉冲簇中的子脉冲个数约为 350 个,每个子脉冲的形状相同,脉宽一致.脉冲簇中子脉冲的高度呈现降低的趋势,主要原因是在初始状态下 Yb 离子的反转粒子数较多,而后随着子脉冲对反转粒子数的消耗,对后几个子脉冲获得的增益减小,导致了放大后子脉冲能量的不均匀.经过第二级放大后的激光功率达到了 1.5 W.

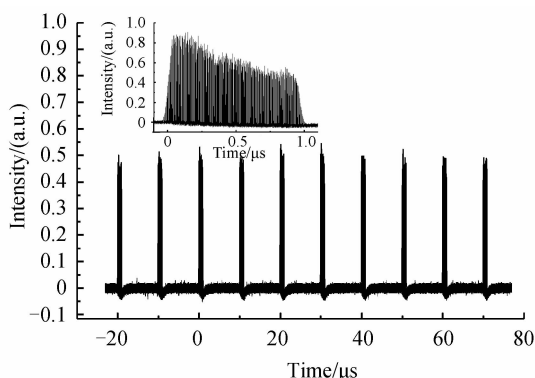


图5 第二级放大后的脉冲簇序列与单个脉冲簇形状
Fig. 5 Pulse-bunch train and shape of the individual pulse bunch from the second amplifier respectively

为了最终实现线偏振的激光输出,第二级预放大后的随机偏振激光通过一个保偏的 ISO 实现线偏振输

出.由于保偏 ISO 的插入损耗,通过 ISO 后功率降低至 0.7 W,这个功率已经足以作为高功率光纤激光放大器的种子源.图6为功率放大级的斜率效率曲线和最大功率时的光谱图.由图可见,经过功率放大之后,能够实现 83 W 平均功率的激光输出,通过增加泵浦激光器的电流,激光功率稳定增长,斜率效率为 69%.当脉冲簇重复频率固定在 100 kHz,脉冲簇中同时存在 350 个子脉冲时,计算得到的最大峰值功率为 12 kW.由光谱图可以看出,80 W 时的光谱 3 dB 带宽增加至 0.18 nm,这是由于 SPM 造成的,实验中观察到较小的受激喇曼散射(Stimulated Raman Scattering, SRS)现象,与激光主峰相差 30 dB.

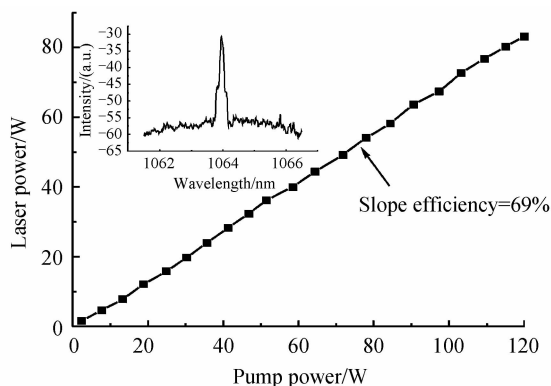


图6 输出激光功率与激光放大器泵浦功率关系
Fig. 6 Output power with respect to the pump power of fiber power amplifier

3 结论

使用增益调制的 DBR 半导体激光器作为种子源,基于 1 级衍射透过的 AOM 作为脉冲选择器件,通过三级光纤激光放大器,研制了一个皮秒脉冲簇输出的高功率线偏振 Yb 光纤激光器,实现了中心波长 1 063.8 nm、脉冲宽度 200 ps、最大平均功率 83 W、脉冲簇重复频率 1 kHz~500 kHz 可调的线偏振激光输出.本文设计的皮秒脉冲光纤激光器将为激光微加工和激光医疗设备提供一种新型的光源选择.

参考文献

- [1] SOBON G, SOTOR J, ABRAMSKI K M. Passive harmonic mode-locking in Er-doped fiber laser based on graphene saturable absorber with repetition rates scalable to 2.22 GHz [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(16): 161109.
- [2] MENG Y, SALHI M, NIANG A, *et al.* Mode-locked er: yb-doped double-clad fiber laser with 75-nm tuning range [J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(7): 1153-1156.
- [3] TU J, PALEOCRASSAS A G, REEVES N, *et al.* Experimental characterization of a micro-hole drilling process with short micro-second pulses by a CW single-mode fiber laser [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, **55**: 275-283.
- [4] WEI K, CHEN T, JIANG P, *et al.* Fiber laser pumped high power mid-infrared laser with picosecond pulse bunch output [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(21): 25364-25372.
- [5] CHANG Li-ping, FAN Wei, GUO Shu-qin. Experimental

- study on self-phase modulation in hundred-picosecond pulse amplification[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1181-1185.
- 常丽萍, 范薇, 郭淑琴. 百皮秒脉冲放大中自相位调制效应实验研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(8): 1181-1185.
- [6] CHAITANYA S, CANALS J, SANCHEZ E, *et al.* Yb-fiber-laser-based, 1.8 W average power, picosecond ultraviolet source at 266 nm[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(10): 2397-2400.
- [7] CHI J, LI P, LIANG B, *et al.* 100-W 430-ps all-fiber picosecond laser by using 10/130- μm ytterbium-doped double-clad fiber and its application in SCS[J]. *Applied Physics B*, 2015, **118**(3): 369-377.
- [8] ERKINTALO M, AGUERGARAY C, RUNGE A, *et al.* Environmentally stable all-PM all-fiber giant chirp oscillator [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(20): 22669-22674.
- [9] YAN Z, LI X, TANG Y, *et al.* Tunable and switchable dual-wavelength Tm-doped mode-locked fiber laser by nonlinear polarization evolution [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(4): 4369-4376.
- [10] LI P, ZHAO Z, ZHANG M, *et al.* Subpicosecond SESAM and nonlinear polarization evolution hybrid mode-locking ytterbium-doped fiber oscillator [J]. *Applied Physics B*, 2015, **118**(4): 561-566.
- [11] LIU Xiao-juan, FU Sheng-gui, GUO Li-ping, *et al.* MOPA structured 1120 nm Yb-doped all fiber amplifier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0906001.
- 刘晓娟, 付圣贵, 郭立萍, 等. 基于 MOPA 结构的 1120 nm 掺 Yb 光纤放大器[J]. *光子学报*, 2014, **43**(9): 0906001.
- [12] SUN Hong, WEI Kai-hua, QIAN Kai, *et al.* Gain switched all-fiberized pulse Yb fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(1): 43-47.
- 孙宏, 魏凯华, 钱凯, 等. 一种基于增益调制技术的全光纤化脉冲 Yb 光纤激光器[J]. *光子学报*, 2013, **42**(1): 43-47.
- [13] ILDAY F, 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.
- [14] YANG H, WANG A, ZHANG Z. Efficient femtosecond pulse generation in an all-normal-dispersion Yb: fiber ring laser at 605 MHz repetition rate [J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(5): 954-956.
- [15] ZHAO Y, MIN S, WANG H, *et al.* High-power figure-of-eight fiber laser with passive sub-ring loops for repetition rate control [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(22): 10475-10480.