

doi: 10.3788/gzxb20164508.0814002

100 W 全光纤化高重复频率窄脉宽光纤激光器

张大勇, 张昆, 李尧, 赵鸿

(固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘要:报道了一种基于主振荡功率放大结构工作的全光纤化高重复频率窄脉宽光纤激光器。种子源是一个直接电脉冲调制的 1 063 nm 光纤耦合输出半导体激光器。为了抑制放大器中产生的放大自发辐射光, 将种子激光的脉冲波形调制为二阶超高斯型。峰值功率为 950 mW 的半导体激光器经过 2 级大模场掺镱双包层光纤放大器(纤芯分别为 10 μm 和 30 μm)功率放大后, 最终获得了平均功率为 101 W、重复频率为 200 kHz、脉冲宽度为 14.77 ns、峰值功率为 34.2 kW、3 dB 光谱宽度为 0.261 nm、光束质量 M^2 为 1.17 的脉冲激光输出。与传统的纳秒级脉冲光纤激光器相比, 该激光器峰值功率高、光束质量优、光谱宽度窄、结构简单, 可广泛应用于激光雷达、遥感探测、倍频和光参量震荡等领域。

关键词:激光器; 光纤激光器; 高重复频率; 窄脉宽; 脉冲

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)08-0814002-5

100 W All-fiberized Pulsed Fiber Laser with High Repetition Rate and Narrow Pulse Duration

ZHANG Da-yong, ZHANG Kun, LI Yao, ZHAO Hong

(Science and Technology on Solid State Laser Laboratory, Beijing 100015, China)

Abstract: An all-fiberized pulsed fiber laser with high repetition rate and narrow pulse duration based on master oscillator power amplifier structure was reported. The seed source is a directly pulse driven fiber pigtailed laser diode working at 1 063 nm. To restrain the generation of amplified spontaneous emission light in the fiber amplifier, the seed is modulated to work at suitable super Gaussian shape. The seed laser with peak power of 950 mW is amplified by two stages Yb³⁺ doped double cladding fibers whose core diameters are 10 μm and 30 μm . At last, the pulsed laser is obtained with an average power of 101W, a repetition rate of 200 kHz, a pulse duration of 14.77 ns, a peak power of 34.2 kW, a 3 dB spectral spectrum width of 0.261 nm and a beam quality factor M^2 of 1.17. Compared with the conventional nanosecond pulsed laser, the proposed fiber laser is essential or more efficiently in many applications, such as laser radar, remote sensing, frequency doubling and optical parametric oscillator, because of its high peak power, good beam quality, narrow spectrum width and simple structure.

Key words: Lasers; Fiber lasers; High repetition rate; Narrow pulse duration; Pulsed

OCIS Codes: 060.2320; 060.2380; 060.3510; 140.3280; 140.3510

0 引言

光纤激光器具有转化效率高、光束质量好、热管理简单、稳定性好等特点, 在诸多领域都有广阔的应用前景^[1-3]。与连续光纤激光器相比, 高重复频率纳秒脉冲光纤激光器在工业加工、激光雷达、遥感探测、光电

干扰和光参量震荡(Optical Parametric Oscillator, OPO)等领域都具有重要的应用价值^[4-6], 因此成为当前固体激光的热点之一。

高重复频率窄脉宽光纤激光器普遍采用主振荡功率放大(Master Oscillator Power Amplifier, MOPA)结构, 其放大器通常采用大模场有源双包层光

基金项目: 国防科技重点实验室基金(No. 9140C040113130C04015)资助

第一作者: 张大勇(1975-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为光纤激光器技术。Email: zdy75@sina.com

通讯作者: 张昆(1985-), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为光纤激光器技术。Email: nukzhang@163.com

收稿日期: 2016-04-25; 录用日期: 2016-07-01

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

纤作为增益介质. 一般来说, 受材料和工艺所限, 纤芯的数值孔径通常都 ≥ 0.05 , 只有采用纤芯 $\leq 25\mu\text{m}$ 的光纤才能保证激光器的近衍射极限输出^[7]. 由于纤芯较细, 脉冲光纤放大器中的受激喇曼散射 (Stimulated Raman Scattering, SRS)、受激布里渊散射 (Stimulated Brillouin Scattering, SBS) 和自相位调制 (Self-Phase Modulation, SPM) 等非线性效应^[8-10] 的阈值功率较低. 虽然采用新型光子晶体光纤作为光纤放大器的增益介质可以有效抑制光纤放大器中的非线性效应^[11-12], 但目前还难以实现全光纤化. 因此, 全光纤化高重复频率、高峰值功率纳秒脉冲光纤激光器的输出功率至今仍停留在百瓦量级.

MOPA 结构高重频窄脉宽光纤激光器种子光源主要分为三大类: 一种是调 Q 固体激光器, 2002 年, Limpert 等^[13] 以固体激光器作为种子光源, 利用芯径为 $30\mu\text{m}$ 的掺 Yb^{3+} 光纤进行放大, 获得了平均功率 100 W、重复频率 50 kHz、脉冲宽度 90 ns 的脉冲激光输出. 由于调 Q 固体激光器的线宽较窄, 非线性效应的阈值较低, 为了抑制高峰值功率激光的非线性效应, 放大过程中通常选用大纤芯直径光纤, 不利于输出激光光束质量的控制, 而且不能实现激光器整体的全光纤化; 另一种是调 Q 光纤激光器, 2007 年, Khitrov 等^[14] 以调 Q 光纤激光器作为种子光源, 利用纤芯直径 $30\mu\text{m}$ 的掺 Yb^{3+} 光纤进行放大, 获得了平均功率 21W、重复频率 20kHz、脉冲宽度 45ns 的脉冲激光输出. 由于调 Q 光纤激光器腔长较长, 输出激光的脉宽较宽, 且由于其输出的脉冲宽度在放大过程中很难压窄, 不易实现窄脉宽激光输出; 第三种是脉冲调制的激光二极管 (Laser Diode, LD), 2012 年, Lin 等^[15] 以光纤耦合输出激光二极管作为种子光源, 先经过电光调制将种子光源调制为窄脉宽信号, 后采用三级光纤级联放大, 获得了平均功率 76W、重复频率 100kHz、脉冲宽度 20ns 的脉冲激光输出. 由于斩波后种子光源的峰值功率和平均功率都很低, 通常必须使用多级放大结构, 使得系统比较复杂.

本文针对采用 MOPA 结构的激光器, 以直接电脉冲调制的光纤耦合输出激光二极管为种子光源进行两级级联放大, 光谱输出特性大幅优化. 对不同脉冲波形在放大过程中的演变过程进行了详细研究, 提出了抑制放大的自发辐射 (Amplified Spontaneous Emission, ASE) 的有效方法, 对抑制脉冲光纤激光器中的 SPM、SRS 和 SBS 等非线性效应做了详细的实验研究并进行了相应的分析.

1 实验装置

图 1 为 MOPA 结构高重频窄脉宽光纤激光器的结构示意图, 激光器采用了种子光源加两级光纤级联

放大的方案. 种子光源是一个波长为 1063 nm 的单模光纤耦合输出半导体激光器. 该激光器是一个复合腔激光器, 内部谐振腔是一个法布里-珀罗腔, 为了增加输出功率稳定性和波长稳定性, 在输出尾纤上光刻了一段光纤布喇格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 作为外腔进行模式选择. 连续工作状态下, 该种子光源的最大输出功率为 400 mW, 3 dB 光谱宽度, 即半峰全宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 为 0.12 nm . 实验中采用电脉冲信号直接对该种子光源进行调制, 通过调节电脉冲信号的形状就可以对光波形进行调制, 其最大输出峰值功率可达 950 mW, FWHM 仍保持在 0.12 nm .

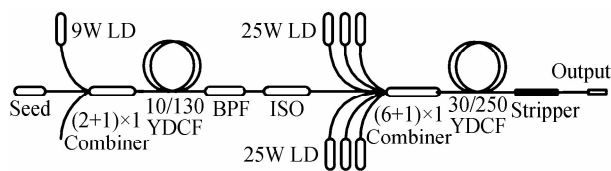


图 1 脉冲光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the pulsed fiber laser

第一级光纤放大器采用 1 个中心波长在 976 nm 的光纤耦合输出激光二极管作为泵浦源, 该泵浦源的最大输出功率为 9 W, 输出尾纤为 $105\mu\text{m}/125\mu\text{m}$ 光纤, 数值孔径为 0.22. 放大器采用的增益光纤为 $10\mu\text{m}/130\mu\text{m}$ 掺 Yb^{3+} 双包层光纤, 其纤芯直径为 $10\mu\text{m}$, 数值孔径为 0.075, 内包层形状为八角形, 内切圆直径为 $130\mu\text{m}$, 数值孔径为 0.46, 对 976 nm 的包层抽运光的吸收为 5.2 dB/m . 脉冲种子光源和泵浦光均通过一个 $(2+1)\times 1$ 的光纤合束器耦合进入双包层增益光纤, 该合束器的信号光输入光纤和输出光纤均为 $10\mu\text{m}/125\mu\text{m}$ 双包层光纤, 纤芯数值孔径为 0.075. 由于第一级光纤放大为小信号放大, 放大器会产生大量的 ASE 光, 故采用一只带宽为 3nm 的带通滤波器 (Band-Pass Filter, BPF) 滤除其中的 ASE 光, 以防止 ASE 光对放大器造成饱和而使信号光放大效率下降. 在输出端接入一只隔离度为 50dB 的隔离器 (Isolator, ISO) 将 2 级光纤放大器隔离开来, 防止反馈光对前级系统造成干扰.

第一级光纤放大器输出的信号激光和第二级光纤放大器的泵浦光均通过一个 $(6+1)\times 1$ 光纤合束器耦合进入增益光纤. 该光纤合束器的信号光输入光纤为 $10\mu\text{m}/125\mu\text{m}$ 双包层光纤, 输出光纤为 $30\mu\text{m}/250\mu\text{m}$ 双包层光纤. 泵浦源为 6 个中心波长在 976 nm 的激光二极管, 该激光二极管的最大输出功率为 25W, 输出尾纤为 $105\mu\text{m}/125\mu\text{m}$ 光纤, 纤芯数值孔径为 0.22. 增益光纤为大模场双包层掺 Yb^{3+} 光纤, 其纤芯和内包层直径分别为 $30\mu\text{m}$ 和 $250\mu\text{m}$, 纤芯数值孔径为 0.06, 内包层数值孔径为 0.46, 对 976 nm 泵浦光的吸收系数为

6.5 dB/m.

为了抑制大芯径光纤放大器的高阶模输出,采用盘绕增益光纤的弯曲损耗滤波技术来抑制高阶模式.较小的光纤盘绕直径可以显著改善激光器的输出光束质量,但过小的光纤缠绕直径会使过多的高阶模式激光泄露到包层中去,光纤缠绕直径折衷选择为 10 cm,最终实验证明继续缩小光纤盘绕直径并不能明显改善输出激光的光束质量.由于光纤盘绕会使纤芯中的部分高阶模式激光泄露到内包层中去,这部分激光以及包层中的剩余泵浦光会使输出激光的光束质量急剧下降,故采取了包层光剥离技术.为避免端面反射引起的干扰振荡,光纤的输出端研磨成 8° 的倾角.

2 实验结果和讨论

经过电脉冲调制后,单模光纤耦合输出 LD 的激光输出峰值功率为 950 mW、脉冲重复频率为 200 kHz、3 dB 光谱宽度为 0.12 nm.

通常,以单模光纤耦合输出 LD 作为种子光源的 MOPA 结构脉冲光纤激光器的结构较为复杂,这是由于放大器的低增益造成的.放大器的单级增益过大会造成 ASE 的比例增大,对脉冲光纤激光器而言,产生的 ASE 主要会产生以下影响和危害:1) ASE 是双向传输的,反向传输的 ASE 会加大隔离器件的工作压力,从而降低激光器的工作稳定性;2) ASE 会导致光谱宽度展宽;3) ASE 是连续光,会降低脉冲信号的放大效率.

抑制光纤放大器中 ASE 产生最为有效的办法就是增加种子光源 LD 的注入功率,为此专门研究了不同脉冲波形在放大过程中的演变过程.将种子光源的波形依次调制成洛伦兹型(Lorentzian)、双曲正割型(Hyperbolic-Secant)、高斯型(Gaussian)和二阶超高斯型(Super Gaussian)后,注入第一级光纤放大器中进行放大,种子光源的脉冲形状会对激光器的输出脉宽产生巨大的影响.在相同的注入脉宽下(40 ns),第一级光纤放大后激光输出脉冲宽度的具体数值如图2:洛伦

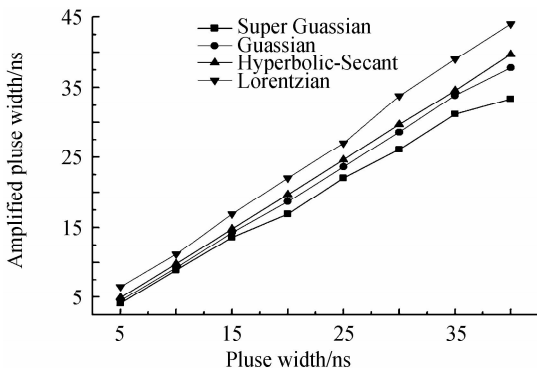


图2 不同脉冲形状下第一级光纤放大器的输出脉冲宽度
Fig.2 Pulse width of the first amplifier at different pulse shape

兹型脉冲信号经过放大器后被急剧展宽;二阶超高斯波形脉冲信号经过放大器后被急剧压窄;高斯型和双曲正割型脉冲信号在经过放大器后被略微压窄,脉冲波形的保持度较好.且随着注入信号脉冲宽度的增大,这种现象更为明显.

因此,最终将种子光源的脉冲波形调制为二阶超高斯型、脉冲宽度调制为 40 ns,在峰值功率保持不变的条件下,信号光的注入平均功率大幅增加(与其它脉冲波形相比),光纤放大器中 ASE 得到了有效的抑制.

当泵浦光注入功率超过 7 W 时,第一级光纤放大器的斜率明显下降,出现了较为明显的增益饱和现象,因此泵浦光注入功率被设定为 7 W.此时,输出激光的平均功率为 2.5 W,脉冲宽度为 33.4 ns,3 dB 光谱宽度展宽为 0.18 nm,中心波长与种子光源波长相同,为 1 063 nm.利用 Photon 公司的光束质量测试仪 ModeScan 1780 对输出光斑进行测试,第一级光纤放大器输出激光的光束质量因子 M^2 约为 1.05,为近衍射极限输出.

由于峰值功率较高,第二级光纤放大器中的 SPM、SRS 以及 SBS 等非线性效应较为明显,这会严重影响信号激光的放大效率、展宽输出激光光谱,严重时甚至会损坏光纤和元器件.由于一般的脉冲光纤激光器在设计时优先考虑泵浦光吸收的充分性,其光谱宽度通常大于 10 nm(高峰值功率情况下).对于本文采用的增益光纤而言,如图 3,缩短增益光纤长度可以显著地改善 SPM、SRS 及 SBS 等非线性效应,但缩短光纤长度会带来对泵浦光的吸收不够、效率下降的问题.为此,在较少地牺牲吸收效率的情况下,最大限度地缩短增益光纤长度,来保证光谱质量.实验中,第二级光纤放大器增益光纤的长度选为 2m,实际泵浦光的吸收率约为 91%,剩余的泵浦光由高效率包层光剥离器滤除.

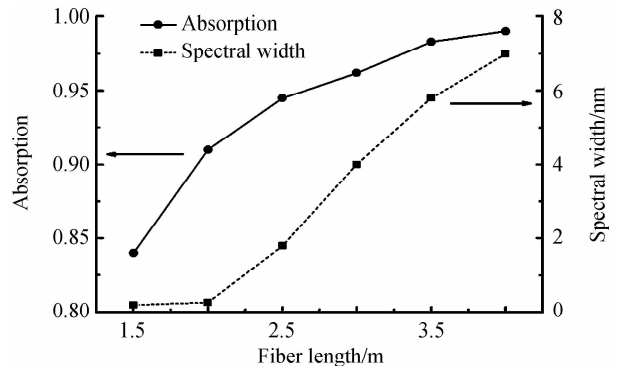


图3 泵浦光的吸收和激光光谱随光纤长度的变化
Fig.3 Absorption of pumping light and spectral width as function of fiber length

将放大后的激光耦合进第二级光纤放大器继续进行放大,经过第二级光纤放大器后输出功率衰减为 1.9 W.激光器最终输出功率与泵浦光功率的关系如

图4,当泵浦激光的功率达到125 W时,获得了平均功率为101 W的脉冲激光输出,光-光转换效率约为79.3%,此时曲线还没有出现明显的斜率下降,这说明此时激光器没有出现增益饱和现象,且包层光剥除器还有较大潜力,若进一步增加泵浦功率,输出激光功率有可能继续提高。

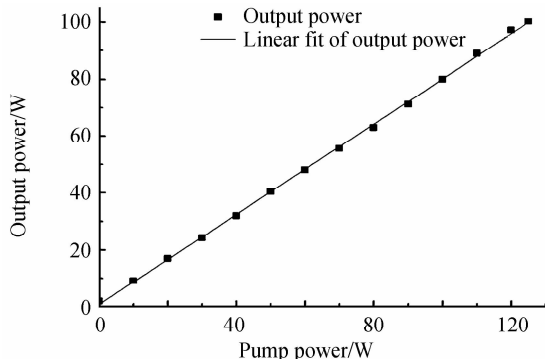


图4 激光器输出功率与抽运功率的关系

Fig. 4 Output power of the lasers as function of the pump power

用光束质量分析仪对输出激光的光束质量进行测量,当激光输出功率达到101W时,其二维光束质量因子 M^2 分别为1.16和1.17,为近基模输出,较低功率工作条件下的光束质量没有明显的劣化,图5给出了测试曲线。

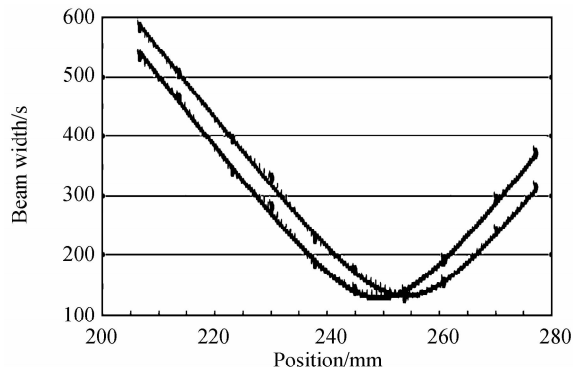


图5 光纤激光器的光束质量

Fig. 5 Beam quality of the fiber lasers

采用YOKOGAWA公司的光谱分析仪AQ6317C对激光器的输出光谱进行了测量.在满功率工作状态下,脉冲光纤激光器的输出光谱如图6,没有出现明显的SBS效应和SRS效应,但由于在放大过程中存在SPM效应,3 dB光谱宽度展宽为0.261 nm,且中心波长为1 030 nm的ASE光强度低于峰值波长强度30 dB以上,这也再次印证了此时的光纤放大器中没有出现增益饱和现象,若进一步增加泵浦功率,输出激光功率可能继续提高。

由于将种子光源的光脉冲形状调制成了二阶超高斯型,随着泵浦注入功率的增加,激光器的脉冲宽度会逐渐变窄.使用PIN管探测器和数字示波器对输出激

光的脉冲波形进行测量,图7为激光脉冲宽度随抽运功率的变化曲线,当激光器的脉宽被压窄至15 ns附近时,增加泵浦功率较难继续压窄脉宽,这是由于激光脉冲信号前沿提取增益的能力较强,脉冲后沿的拖尾现象难以完全避免。

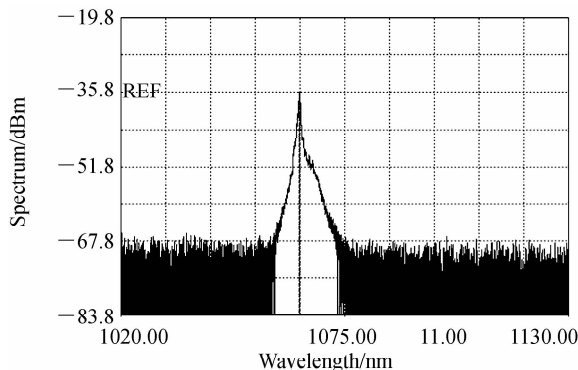


图6 满功率工作状态下激光的输出光谱

Fig. 6 Spectrum of the fiber lasers at the full output power

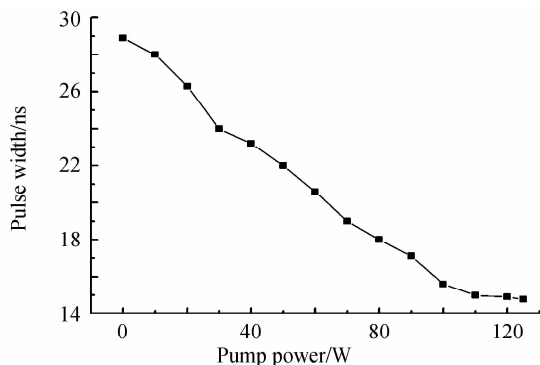


图7 输出激光脉冲宽度随抽运功率的变化

Fig. 7 Pulsed width as function of the pump power

在放大过程中,由于激光脉冲信号上升沿的增益提取能力较强,下降沿的宽度通常大于上升沿的宽度.满功率工作状态下的激光脉冲波形如图8,整个脉冲的平均宽度为14.77 ns,脉冲宽度稳定性均方根小于5%,上升沿平均脉冲宽度仅为5.28 ns。

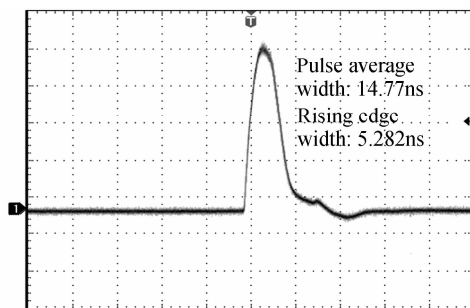


图8 满功率工作状态下激光的脉冲波形

Fig. 8 Pulse shape of the fiber lasers at the full output power

3 结论

本文报道了一种采用MOPA结构,以脉冲调制单模光纤耦合输出LD为种子光源进行两级放大的高功

率脉冲光纤激光器,其输出峰值功率可达 34.2 kW、脉冲宽度为 14.77 ns、重复频率为 200 kHz、光束质量因子 M^2 约为 1.17,整机光-光转换效率为 76.5%。该激光器具有峰值功率高、光束质量优、光谱宽度窄、结构简单等优点,可广泛应用于激光雷达、遥感探测、倍频和光参量震荡等领域。

参考文献

- [1] KOROSHETZ J. Fiber lasers for lidar[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2005, OFJ4.
- [2] CHEN Tao, WEI Kai-hua, JIANG Pei-pei, *et al.* High-power multichannel PPMgLN-based optical parametric oscillator pumped by a master oscillation power amplification-structured Q-switched fiber laser[J]. *Applied Optic*, 2012, **51**(28):6881-6885.
- [3] LIU A, NORSEN M, MEAD R, *et al.* 60W green output by frequency doubling of a polarized Yb-doped fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(1):67-69.
- [4] YE Chang-geng, GONG Ma-li, YAN Ping, *et al.* Linearly polarized single-transverse-mode high-energy multi-ten nanosecond fiber amplifier with 50W average power[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(17):7604-7609.
- [5] LIMPET J, HOFFER S, LIEM A, *et al.* 100-W average power high-energy nanosecond fiber amplifier [J]. *Applied Physics B*, 2002, **75**:477-479.
- [6] VU K, MALINOWSKI A, RICHARDSON D, *et al.* Adaptive pulse shape control in a diode-seeded nanosecond fiber MOPA system[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(23):10996-11001.
- [7] KOPLOW J, KLINER D, GOLDBERG L. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(7):442-444.
- [8] CHANG Li-ping, FAN Wei, GUO Shu-qin. [J]. Experimental study on self-phase modulation in hundred-picosecond pulse amplification[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8):1181-1185.
- [9] SPĂTARU T, PREDĂ L, OSICEANU P, *et al.* 100-W single-frequency master-oscillator fiber power amplifier [J]. *Optics Letters*, 2003, **28**(17):1537-9.
- [10] LI Ya-bin, JIA Dong-fang, PANG Song-tao, *et al.* Stimulated raman scattering and its suppression in a single-mode fiber induced by high-power nanosecond optical pulse [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **28**(17):3198-3202.
- [11] HE Jun, YE Ping., WUSHOUER X, *et al.* 72-kW high-peak-power linearly-polarized single-mode pulsed fiber laser with 80 kHz repetition rate and 4.5 ns duration[J]. *Laser Physics*, 2011, **21**(1):180-183.
- [12] HORIUCHI R, SAIKI K, ADACHI K, *et al.* High-peak-power second-harmonic generation of single-stage Yb-doped fiber amplifiers[J]. *Optical Review*, 2008, **15**(3):136-139.
- [13] LIMPET J, ZELLMER H. High average power millijoule fiber amplifier system[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, Lasers and Electro-Optics. Long Beach: CLEO, 2002:591-592.
- [14] KHITROV V, SAMSON B, MACHEWIRTH D, *et al.* High peak power pulsed single-mode linearly polarized LMA Fiber amplifier and Q-switch laser[C]. SPIE, 2007, **6453**:645305.
- [15] LIN De-jiao, SU A, SHEN Yong-hang, *et al.* Large aperture PPMgLN based high-power optical parametric oscillator at 3.8 μm pumped by a nanosecond linearly polarized fiber MOPA [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(14):15008-15014.