

# 高功率线偏振皮秒脉冲掺镱全光纤激光器

李燕苹 刘江 师红星 孙若愚 王璞

(北京工业大学激光工程研究院, 国家产学研激光技术中心, 北京 100124)

**摘要** 高功率线偏振皮秒脉冲激光光源在工业加工、相干光束合成和非线性光学等领域有广泛的应用。报道了基于半导体可饱和吸收镜锁模的高功率线偏振皮秒脉冲掺镱全光纤激光器。激光器采用两级主振荡功率放大(MOPA)结构。种子源采用环形腔结构,在抽运功率为 200 mW 时,获得了重复频率为 40 MHz、脉冲宽度为 20 ps 的锁模脉冲输出,平均输出功率为 12 mW,中心波长为 1038.2 nm,光谱宽度为 1.7 nm,光谱明显的陡沿结构表明在全正色散光纤激光器中形成了耗散孤子。经过两级双包层保偏掺镱光纤放大器,获得了平均功率为 5 W 的输出,相应的单脉冲能量和峰值功率分别为 125 nJ 和 6.25 kW。在最大输出功率时,没有出现受激拉曼散射等非线性现象,此时激光脉冲光谱宽度为 3.1 nm,脉冲宽度为 20 ps,偏振消光比为 20 dB。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 被动锁模; 超短脉冲; 线偏振

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1102008

## High Power Linearly-Polarized Picosecond Pulsed Ytterbium-Doped All-Fiber Laser

Li Yanping Liu Jiang Shi Hongxing Sun Ruoyu Wang Pu

(National Center of Laser Technology, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** High average power linearly-polarized picosecond pulsed laser sources have a wide range of applications in the fields of industrial material processing, coherent beam combination and nonlinear optics. A high power linearly polarized picosecond pulse ytterbium-doped all-fiber laser based on a seed of mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror is reported. The fiber laser is constructed with a two-stage master oscillator power amplifier (MOPA) configuration. Stable mode-locked pulse train occurs when the incident pump power increasing and the pulse repetition rate is 40 MHz in a ring cavity configuration. Increasing the incident pump power to 200 mW, the maximum output average power is 12 mW. The pulse width is measured to be 20 ps. The center wavelength and the spectrum bandwidth are 1038.2 nm and 1.7 nm, respectively. The steep edge in the optical spectrum is a clear indication of the dissipative solitons (DSs) in this all-normal-dispersion mode-locked fiber laser. After two-stage fiber amplifier with the polarization maintaining double-cladding ytterbium-doped fiber as the gain medium, 5 W average output power is achieved, corresponding to a single pulse energy of 125 nJ and a peak power of 6.25 kW, respectively. No undesirable nonlinear processes such as stimulated Raman scattering are observed. At this high output power, the spectrum bandwidth and the pulse width are measured to be 3.1 nm and 20 ps, respectively, and the polarization extinction ratio is 20 dB.

**Key words** lasers; fiber laser; passively mode-locking; ultra-short pulse; linear polarization

**OCIS codes** 140.3280; 140.3615; 140.405; 0140.7090

收稿日期: 2013-04-01; 收到修改稿日期: 2013-05-20

基金项目: 北京市自然科学基金重点项目(KZ2011100050011)

作者简介: 李燕苹(1990—),女,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: liyanpingemail@126.com

导师简介: 王璞(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件等方面的研究。E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

## 1 引言

高功率脉冲光纤激光器具有效率高、光束质量优良、散热方便、结构简单紧凑等优点,在很多应用领域都优于传统的固体激光器和气体激光器<sup>[1-5]</sup>。在光纤激光器中,获得高功率脉冲激光输出一般采用主振荡功率放大(MOPA)结构,通过将平均功率较低的高质量种子源进行多级放大,在保证良好的光束质量的同时能够获得高功率、高能量输出<sup>[6-10]</sup>。

掺镱光纤相比于掺杂其他稀土元素的光纤,具有很多独特的优点:简单的能级结构,不存在对抽运光和信号光的激发态吸收,上能级寿命长,不存在浓度淬灭效应,因而可以有很高的掺杂浓度,从而在较短的光纤长度就可以有很高的增益,适用于高功率放大;吸收光谱和增益带宽较宽,对抽运光选择有更大的灵活性,光电和光-光转换效率高,这些优点使 $1\ \mu\text{m}$ 波段的掺镱皮秒脉冲在例如激光加工、材料处理和非线性频率转换领域都有广泛的应用<sup>[11-19]</sup>。

在相干光束合成、非线性波长转换等领域都需要线偏振的激光光源,所以高功率线偏振脉冲光纤激光器具有很大的研究意义,也成了国际上当前的研究热点之一<sup>[18-20]</sup>。近几年来,国内外很多研究小组都报道了高功率线偏振光纤激光器的研究成果。2010年,南安普顿大学光电子研究中心的研究人员报道了以增益开关激光器为种子源,重复频率为 $56\ \text{MHz}$ 、脉冲宽度为 $21\ \text{ps}$ ,经3级级联保偏光纤放大级获得了平均功率高达 $100\ \text{W}$ 输出,相应的峰值功率为 $85\ \text{kW}$ ,最大脉冲能量 $1.7\ \mu\text{J}$ <sup>[17]</sup>。国内在获得线偏振脉冲激光输出方面的研究主要集中在准连续、宽脉宽(几十纳秒)的输出。2009年,浙江大学报道了对重复频率在 $20\sim 50\ \text{kHz}$ 可调、脉冲宽度为 $30\ \text{ns}$ 的种子源采用一级大芯径全保偏光纤结构放大,实现了 $23.5\ \text{W}$ 线偏振输出<sup>[8]</sup>,而对全光纤皮秒脉冲的高功率线偏振输出的研究还未见报道。

本实验报道了以半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模的光纤激光器作为种子源、两级保偏光纤放大的全光纤结构的皮秒掺镱脉冲光纤激光器。种子源采用环形腔结构,获得了重复频率为 $40\ \text{MHz}$ 、脉冲宽度为 $20\ \text{ps}$ 的锁模激光脉冲,中心波长在 $1038.2\ \text{nm}$ , $3\ \text{dB}$ 光谱宽度为 $1.7\ \text{nm}$ 。种子激光器经保偏光纤隔离器后,得到了 $4.5\ \text{mW}$ 的线偏振激光输出,采用熊猫型掺镱双包层保偏光纤作为增益介质,通过两级功率放大结构,获得了平均功率为 $5\ \text{W}$ 、偏振消光比为 $20\ \text{dB}$ 的线偏振光输出,斜率效率为 $35\%$ 。

## 2 实验装置

种子源是 SESAM 被动锁模掺镱光纤激光器,其结构如图 1 所示。采用环形腔结构,能够抑制自脉冲的产生。抽运源采用尾纤输出的单模半导体激光器(LD),中心波长为 $976\ \text{nm}$ ,最大输出功率为 $500\ \text{mW}$ ;采用反向抽运方式,能够提高输出功率并且能有效剥离抽运光。采用波分复用器(WDM)将抽运光耦合进增益光纤(YDF)。整个环形腔长度大约为 $5\ \text{m}$ ,主要包括大约 $1\ \text{m}$ 长的单包层掺镱光纤(Nufern SM-YSF-HI),纤芯直径为 $7\ \mu\text{m}$ ,数值孔径为 $0.11$ ,包层直径为 $125\ \mu\text{m}$ ,在 $975\ \text{nm}$ 处的纤芯抽运吸收率大约为 $250\ \text{dB/m}$ 。脉冲激光从分束器的 $30\%$ 端输出, $70\%$ 端反馈到腔内循环。反射式结构的半导体可饱和吸收镜与3端口环形器二号端口处光纤直接耦合以实现锁模,种子激光器输出尾纤熔接保偏光纤隔离器,能够使偏振态随机输出的种子光实现线偏振光输出,同时光纤隔离器能防止后面放大级激光反射回种子激光器而造成损坏。

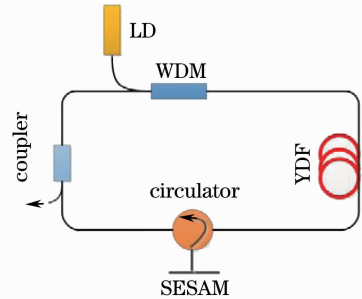


图 1 被动锁模掺镱超短脉冲光纤激光器结构图

Fig. 1 Structure diagram of the passively mode-locked ytterbium-doped ultra-short pulsed fiber laser

由于得到的线偏振的种子光功率较小,所以光纤放大器采用两级级联放大结构,如图 2 所示。预放大级的抽运源采用尾纤输出的半导体激光器(LD),其中中心波长为 $976\ \text{nm}$ ,最大输出功率为 $10\ \text{W}$ 。实验采用前向抽运的方式,利用多模合束(PM combiner)器实现抽运光和信号光的耦合。增益光纤采用是 nLIGHT 公司的 LIEKKI Yb1200-6/125 DC-PM 保偏双包层光纤(PM YDF),纤芯和内包层直径分别是 $6\ \mu\text{m}$ 和 $125\ \mu\text{m}$ ,数值孔径分别为 $0.15$ 和 $0.46$ ,在 $976\ \text{nm}$ 处包层吸收率为 $2.6\ \text{dB/m}$ ,长度为 $8\ \text{m}$ 。增益光纤后熔接一段相同芯径的保偏无源光纤(Nufern PM980-XP)以剥离未吸收的抽运光,经过保偏光纤隔离器(PM ISO)进入下一放大级。主功率放大级以 2 个最大输出功率为 $30\ \text{W}$ 的多模半导体激光器为抽运源,增益光纤为

nLIGHT 公司的 LIEKKI Yb1200-20/125 DC-PM 保偏双层掺镱光纤,纤芯和内包层直径分别为  $20\ \mu\text{m}$  和  $125\ \mu\text{m}$ ,数值孔径分别为 0.08 和 0.46,在  $976\ \text{nm}$  处包层吸收率为  $30\ \text{dB/m}$ ,长度为  $2\ \text{m}$ 。增益光纤之后熔接一段相同芯径的无源保偏光纤 (Passive LIEKKI PM 20/125) 用来剥离未吸收的抽

运光。由于在放大过程中产生的放大自发辐射 (ASE) 反馈回腔内会损坏元器件,所以在保偏无源光纤之后熔接高功率保偏光纤隔离器作为输出端口,同时为了避免光纤输出端面  $4\%$  菲涅耳反射产生的激光寄生振荡对激光器的损坏,输出端以  $8^\circ$  角切割。

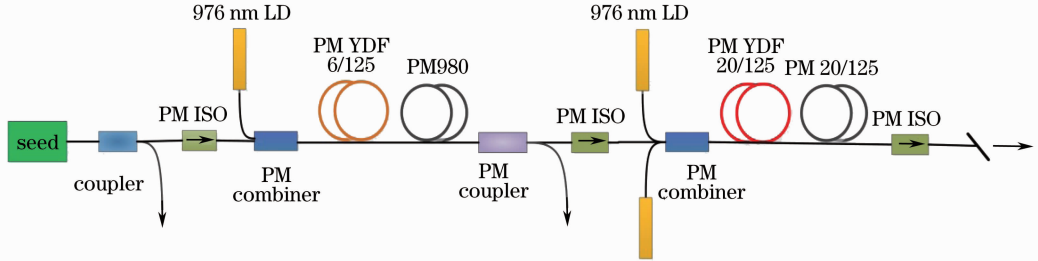


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Experimental structure schematic diagram

### 3 实验结果与分析

适当调节光纤输出端面和半导体可饱和吸收镜之间的耦合,缓慢增加抽运功率,种子激光器开始出现稳定的脉冲激光,其重复频率为  $40\ \text{MHz}$ ,与激光器总腔长  $5\ \text{m}$  相吻合。图 3(a) 是通过  $1.8\ \text{GHz}$  的光电探头和  $1\ \text{GHz}$  的示波器测得的稳定的锁模脉

冲串。当抽运功率增加至  $200\ \text{mW}$  时,获得了平均功率为  $12\ \text{mW}$  的输出,进一步增加抽运功率会发生脉冲分裂现象。通过  $25\ \text{GHz}$  的实时示波器和  $25\ \text{GHz}$  高速光电探头测量脉冲宽度,如图 3(b) 所示,其半峰全宽为  $30\ \text{ps}$ ,假设脉冲形状是高斯型,则锁模激光的脉冲宽度  $\tau = 20\ \text{ps}$ 。

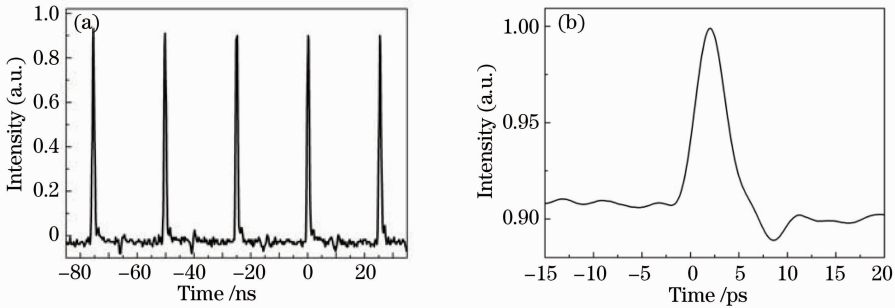


图 3 种子源锁模光纤激光器的输出特性。(a) 脉冲串;(b) 单脉冲

Fig. 3 Output characteristics of mode-locked seed fiber laser. (a) Pulse train; (b) single pulse

图 4 是用最小分辨率为  $0.02\ \text{nm}$  的光谱分析仪 (YOKOGAWA AQ6370C) 测得的输出脉冲的光谱,其中心波长为  $1038.2\ \text{nm}$ ,  $3\ \text{dB}$  光谱宽度为  $1.7\ \text{nm}$ ,光谱具有明显的陡沿边沿特征,表明全正色散光纤激光器中形成了耗散孤子。此时输出脉冲的偏振态随机,经过保偏光纤隔离器后,得到了平均功率  $4.5\ \text{mW}$  的线偏振激光输出。线偏振的种子光经过光纤预放大级后,其平均输出功率随抽运功率几乎呈线性关系增加,在抽运功率为  $3\ \text{W}$  时,得到了  $300\ \text{mW}$  的平均功率输出(受限于该放大级所用保偏光纤分束器最大承受功率)。用示波器和光谱分析仪对分束器输出端脉冲进行监测,结果表明经

过光纤预放大级仍能维持稳定锁模状态,光谱形状也无明显变化,只是光谱宽度略有展宽。

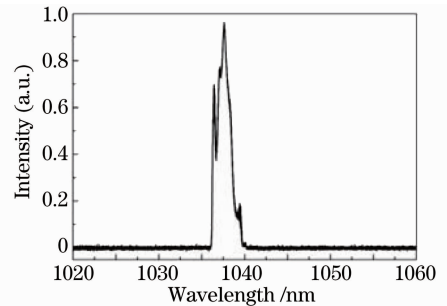


图 4 种子源锁模光纤激光器的输出光谱

Fig. 4 Output spectrum of the mode-locked seed fiber laser

经过分束器 80% 输出端和保偏光纤隔离器, 信号光耦合进保偏光纤合束器, 由于保偏光纤元器件之间的熔接损耗和插入损耗都比较大, 所以进入下一放大级的信号光功率只有 100 mW。主放大级平均输出功率随抽运功率几乎呈线性增加, 如图 5 所示, 在抽运功率为 14.1 W 时, 获得了平均功率为 5 W 的输出, 光-光转换效率为 35%, 相应的峰值功率和单脉冲能量分别是 6.25 kW 和 125 nJ。在最大功率处没有出现饱和现象, 表明通过增加抽运功率可实现更高功率输出。用示波器和光谱分析仪对输出脉冲进行监测, 结果表明放大后的锁模脉冲串与种子源无明显区别, 仍能维持稳定的锁模状态, 脉冲宽度仍为 20 ps, 如图 6(a) 所示, 光谱形状也无明

显变化, 即使在最大输出功率下, 并没有发生受激拉曼散射等非线性现象, 只是光谱宽度有所展宽, 此时的光谱宽度为 3.1 nm, 如图 6(b) 所示。

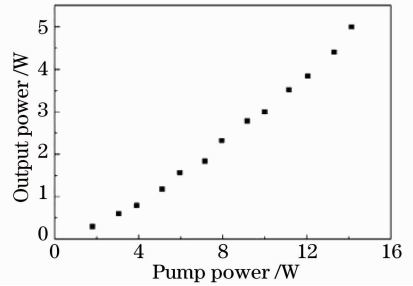


图 5 平均输出功率随抽运功率的变化  
Fig. 5 Average output power versus pump power

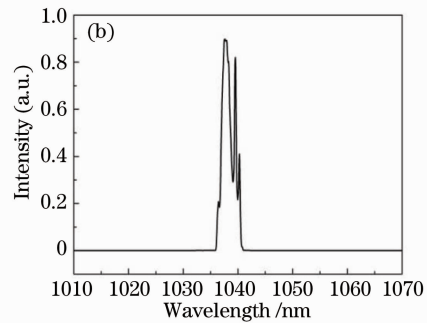
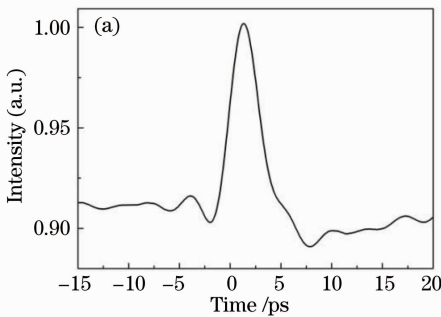


图 6 保偏光纤放大器的输出特性。(a) 光谱; (b) 单脉冲

Fig. 6 Output characteristics of the polarization-maintaining amplifier. (a) Optical spectrum; (b) single pulse

为了检测激光器输出脉冲的偏振特性, 将输出端激光进行聚焦准直后, 先后通过置于带角度刻度调整架上的半波片和偏振片, 固定偏振片位置, 旋转半波片一周, 在不同旋转角度下测量输出功率, 读出最大值和最小值, 根据偏振消光比公式:  $R_{PS} = 10 \lg(P_{max}/P_{min})$ , 就可以得到其偏振消光比。实验测得输出脉冲的偏振消光比是 20 dB。

## 4 结 论

报道了采用两级主振荡功率放大结构的高功率线偏振皮秒脉冲全光纤激光器。种子源激光器采用环形腔结构, 利用半导体可饱和吸收镜作为被动锁模器件, 实现了重复频率为 40 MHz、脉冲宽度为 20 ps 的脉冲, 中心波长为 1038.2 nm、3 dB 光谱宽度为 1.7 nm, 经过两级保偏掺镱光纤放大器, 获得了 5 W 线偏振输出, 偏振消光比为 20 dB。通过进一步增加抽运功率和更好地处理主放大级散热问题可实现更高功率输出。这种高功率全光纤 MOPA 型线偏振脉冲光纤激光器结构紧凑、稳定性好, 可用作非线性频

率转换实现可见和中红外波段的激光光源。

## 参 考 文 献

- Liu Jia, Liu Jiang, Wang Pu. Cladding pumped nanosecond passively Q-switched Yb-doped fiber laser with Cr<sup>3+</sup>:YAG as saturable absorber [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1102002.
- 刘 佳, 刘 江, 王 璞. Cr<sup>3+</sup>:YAG 被动调 Q 纳秒脉冲包层抽运掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1102002.
- Liu Jiang, Wang Pu. High-power passively mode-locked thulium-doped femtosecond fiber laser at 2.0 μm [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0902001.
- 刘 江, 王 璞. 高功率被动锁模 2.0 μm 掺铥飞秒脉冲光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0902001.
- Chen Shengping, Lin Dongfeng, Hou Jing, et al.. Passively mode locked Yb-doped fiber laser with nearly 2 W average output power[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(11): 2817-2821.
- 陈胜平, 林东风, 侯 静, 等. 平均功率近 2 W 的被动锁模皮秒掺铥光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2817-2821.
- P Dupriez, A Piper, A Malinowski, et al.. High average power, high repetition rate, picosecond pulsed fiber master oscillator power amplifier source seeded by a gain-switched laser diode at 1060 nm [J]. IEEE Technology Letters, 2006, 18(9): 1013-1015.
- S P Chen, H W Chen, J Hou, et al.. 100 W all fiber picosecond MOPA laser[J]. Opt Express, 2009, 17(26): 24008-24012.
- Changgeng Ye, Mali Gong, Ping Yan, et al.. Linearly-polarized

- single-transverse-mode high-energy multi-ten nanosecond fiber amplifier with 50 W average power[J]. *Opt Express*, 2006, 14(7): 7604–7609.
- 7 Liu Jiang, Wang Pu. 2  $\mu\text{m}$  thulium-doped ultrafast all-fiber laser with watts-level average output power[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0802004.  
刘江, 王璞. 瓦级输出全光纤结构 2.0  $\mu\text{m}$  掺铥皮秒脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0802004.
- 8 Wang Yuanxiang, Jiang Peipei, Yang Dingzhong, *et al.*. All-fiberized master oscillator power amplifier structured pulsed Yb fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(7): 1861–1865.  
汪园香, 姜培培, 杨丁中, 等. 全光纤结构主振荡功率放大大型掺铥脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1861–1865.
- 9 P P Jiang, D Z Yang, Y X Wang, *et al.*. All-fiberized MOPA structured single-mode pulse Yb fiber laser with a linearly polarized output power of 30 W[J]. *Laser Physics Letters*, 2009, 6(5): 384–387.
- 10 F Kienle, S Alam, P S Teh, *et al.*. High power high repetition rate picosecond optical parametric oscillator pumped by frequency doubled all-fiber Yb-doped MOPA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 456–459.
- 11 P Dupriez, J K Sahu, A Malinowski, *et al.*. 80 W green laser based on a frequency-doubled picosecond, single-mode, linearly-polarized fiber laser [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2006, CThJ1.
- 12 Dong Xiaolin, Xiao Hu, Ma Yanxing, *et al.*. High power polarization-maintaining master oscillator power amplifier fiber laser in all-fiber format[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(6): 064207.  
董小林, 肖虎, 马阎星, 等. 高功率全光纤保偏主振荡功率放大大型光纤激光器的实验研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(6): 064207.
- 13 V Khitrov, B Samson, D Machewirth, *et al.*. 50 W single-mode linearly polarized high peak power pulsed fiber laser with tunable ns- $\mu\text{s}$  pulse durations and kHz-MHz repetition rates[C]. *SPIE*, 2008, 6873: 68730C.
- 14 K Tankala, A Carter, D Machewirth, *et al.*. PM double-clad fibers for high power lasers and amplifiers[C]. *SPIE*, 2003, 4974: 220–229.
- 15 A Liu, M A Norsen, R D Mead. 60 W green output by frequency doubling of a polarized Yb-doped fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(1): 67–69.
- 16 A V Babushkin, D V Gapontsev, N S Platonov, *et al.*. Pulsed fiber laser with 30 W output power at 532 nm[C]. *SPIE*, 2006, 6102: 61021E.
- 17 K K Chen, J H V Price, S Alam, *et al.*. Polarization maintaining 100 W Yb-fiber MOPA producing  $\mu\text{J}$  pulses tunable in duration from 1 to 21 ps[J]. *Opt Express*, 2010, 18(14): 16385–16394.
- 18 P Dupriez, J K Sahu, Y Jeong, *et al.*. High-power, high-brightness green laser based on a frequency doubled picosecond fiber laser[C]. *SPIE*, 2007, 6453: 64531H.
- 19 Li Yalan, Ning Tigang, Wen Xiaodong, *et al.*. Research progress of single polarization fiber lasers[J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2011, 5: 3.  
李亚岚, 宁提纲, 温晓东, 等. 单偏振光纤激光器的研究进展[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2011, 5: 3.
- 20 Li Rongtao, Wang Xiaolin, Zhou Pu, *et al.*. Resent research and development of beam combination of high power pulse fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(10): 101401.  
栗荣涛, 王小林, 周朴, 等. 高功率脉冲光纤激光光束合成的最新研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(10): 101401.

栏目编辑: 宋梅梅