

文章编号: 0258-7025(2009)11-2817-05

# 平均功率近 2 W 的被动锁模皮秒掺镱光纤激光器

陈胜平 林东风 侯 静 刘泽金

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 报道了一个三级主振荡功率放大(MOPA)结构的瓦级皮秒光纤激光器。第一级利用半导体可饱和吸收镜(SESAM)和光纤光栅组成线性腔,构建了一个低功率的被动锁模掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器,其最大平均输出功率为 9.2 mW,作为整个激光器的种子源;第二级采用单模掺镱光纤放大器对种子光进行预放大,得到 108 mW 平均输出功率;第三级采用带树状耦合器的双包层掺镱光纤放大器进行功率放大,获得了 1.9 W 平均输出功率。得到的脉冲脉宽 36 ps,中心波长 1064 nm,重复频率 29.6 MHz,峰值功率 1.8 kW,相应的单脉冲能量为 61 nJ。实验中观察到种子源输出光谱中有一个凹陷,这是由于光纤光栅反射率过高并且带宽较窄引起的。

**关键词** 光纤光学;光纤激光器;半导体可饱和吸收镜;被动锁模;光纤放大器;皮秒脉冲;主振荡功率放大

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.2817

## Passively Mode Locked Yb-Doped Fiber Laser with Nearly 2 W Average Output Power

Chen Shengping Lin Dongfeng Hou Jing Liu Zejin

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** A watt-level Yb-doped ps fiber laser in tri-stage master oscillator power amplifier (MOPA) configuration is investigated. The first stage is a semiconductor saturable absorption mirror (SESAM) passively mode locked fiber laser with a low average output power of 9.2 mW. A fiber Bragg grating (FBG) is utilized as the output laser cavity mirror. The second stage is an Yb-doped single mode fiber amplifier with a moderate average output power of 108 mW. The last stage is a double clad Yb-doped power amplifier which increases the average output power to 1.9 W. The center wavelength of the mode locked pulse is 1064 nm with a pulse width of 36 ps. The pulse repetition rate, the peak power and the energy of a single pulse is 29.6 MHz, 1.8 kW and 61 nJ, respectively. A small dip located at the center laser wavelength is observed on the output spectrum, which is considered to be caused by the high reflectivity and the narrow bandwidth of the FBG.

**Key words** fiber optics; fiber laser; semiconductor saturable absorption mirror; passively mode locking; fiber amplifier; picosecond laser pulse; master oscillator power amplifier

## 1 引 言

近十年来,伴随着半导体制造技术和光纤制作技术的逐渐成熟,光纤激光器的输出功率水平得到了快速提升。目前,基横模连续波运转的光纤激光器输出功率已经达到 6 kW<sup>[1]</sup>,但由于技术上存在瓶颈,脉冲方式运转的光纤激光器的最高平均输出功

率却只有几百瓦<sup>[2]</sup>,远低于连续波运转的激光器。由于高平均功率脉冲激光在工业加工、基础科学研究等诸多领域都具有重要的应用价值,各国的科研工作者都在积极努力地提高脉冲光纤激光器的性能指标<sup>[3~7]</sup>。

与连续波光纤激光器通常采用一级结构直接制

收稿日期: 2008-10-15; 收到修改稿日期: 2009-02-26

基金项目: 中国博士后科学基金(第 43 批)面上资助项目和中国博士后科学基金(首批)特别资助项目资助课题。

作者简介: 陈胜平(1979—),男,博士后,主要从事光纤激光器、放大器及光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: chensp@nudt.edu.cn

作而成不同,脉冲光纤激光器由于其极高峰值功率和脉冲能量所具有的极强破坏力,很难直接采用一级结构得到较高的平均输出功率,通常都采用主振荡功率放大(MOPA)结构<sup>[3]</sup>。主振荡器是一个低功率的脉冲种子激光器,用于产生性能优异的种子激光,由于平均输出功率低,其光束质量、光谱特性、时域特性都较易控制;放大器用于对种子光进行功率放大。这种结构能够在保证高输出光束质量的同时得到高输出功率。目前国际上报道的最高平均功率脉冲光纤激光即是采用 MOPA 结构得到的<sup>[2]</sup>。

对 MOPA 结构超短脉冲光纤激光进行研究且得到较好实验结果的国外单位主要有英国的南安普顿大学<sup>[2]</sup>、德国的耶拿大学<sup>[8]</sup>、美国的 IPG 公司等,国内的单位有南开大学<sup>[9]</sup>、天津大学<sup>[10]</sup>、中科院上海光机所<sup>[11]</sup>、西安光机所<sup>[12]</sup>等。但总体来说,高平均功率 MOPA 结构的脉冲光纤激光器的研究还只处于起步阶段,许多关键问题有待解决,需要更为广泛和深入的研究。

## 2 实验原理与装置

半导体可饱和吸收镜(SESAM)被动锁模光纤激光器利用 SESAM 的非线性效应对腔内的振荡模进行调制。SESAM 对激光的吸收随光强的增加而减弱,即对强度较弱的光吸收很强,而对强度较大的光吸收很弱。因此,在激光器的初始不规则振荡模式中,较强的光脉冲经过多次循环后强度会越来越大,而较弱的光脉冲经过多次循环后强度会越来越小直至最终湮灭。这种使强光更强、弱光更弱的模式导致最终激光腔中只剩下强度最大的脉冲激光,实现稳定锁模。

图 1 是用到的实验结构示意图。整个激光器由三个部分组成:被动锁模脉冲种子源、一级放大器和

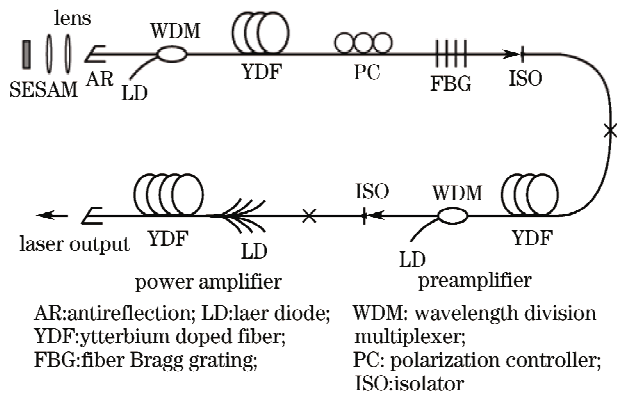


图 1 实验结构示意图

Fig. 1 Experimental structure schematic diagram

二级放大器,在图中用两个“×”分隔开。

种子源是利用 SESAM 构建的被动锁模光纤激光器。增益介质采用 0.5 m 高浓度掺镱光纤,商家给出该光纤在 976 nm 处的吸收系数为 1200 dB/m;光纤布拉格光栅(FBG)中心波长为 1064 nm,反射率 94.3%,带宽约 0.15 nm,其透射谱图如图 2 所示;抽运源为带尾纤的 975 nm 半导体激光器,最大抽运功率约 120 mW;偏振控制器是一个光纤型偏振控制器,其作用是为了调节激光谐振腔中光的偏振态。光纤与 SESAM 之间采用透镜组进行耦合,从光纤发出的光经过透镜组后汇聚在 SESAM 上,经 SESAM 吸收反射后沿原路返回进光纤中,其耦合效率大约为 40%。为减少光纤端面反射带来的不利影响,与透镜进行耦合的光纤头处理成约 8° 的斜角。SESAM 采用 BATOP 公司生产的 SAM-1064-45 型可饱和吸收镜,吸收层为多量子阱结构,高反区( $R > 55\%$ )为 1010~1120 nm,调制深度为 30%,非饱和吸收损耗为 15%,恢复时间为 9 ps,饱和通量为 30  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ,破坏阈值为 200  $\text{MW}/\text{cm}^2$ 。种子源最大平均输出功率 9.2 mW,中心波长 1064 nm,重复频率 30 MHz,脉冲宽度 36 ps。

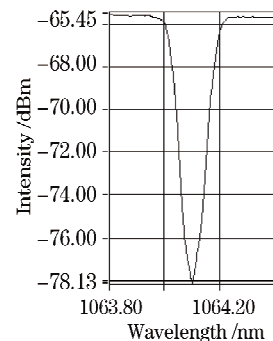


图 2 光纤光栅透射谱图

Fig. 2 Transmission spectrum of the fiber Bragg grating

一级光纤放大器的增益介质与种子源增益介质均为长 1 m 的高浓度的掺镱光纤。抽运源采用 330 mW 带尾纤的 975 nm 半导体激光器,其驱动源带有温控系统,可保证输出波长的稳定性。

二级光纤放大器采用的是德国 Nufern 公司生产的带树状耦合器的放大模块(抽运端光纤参数为 105/125/245,  $d_{\text{NA}} = 0.22$ ),可以同时由六路 LD 进行抽运,其增益介质为掺镱双包层光纤。放大模块的抽运源为 Alfalight 公司生产的 AM6-976B-10-604 型 LD(尾纤参数为 105/125/245,  $d_{\text{NA}} = 0.15$ )。抽运源尾纤与放大模块抽运端光纤之间直接熔接。

### 3 实验结果与分析

当种子源部分抽运功率为 60 mW 时,得到了稳定的锁模脉冲输出,其重复频率约为 29.6 MHz,脉冲宽度约为 36 ps,最大平均输出功率为 9.2 mW。通过示波器测得的典型锁模脉冲时域特性如图 3 所示,用自相关仪测得的脉冲自相关迹如图 4 所示,图中显示脉冲宽度为 36 ps。用光谱仪测得的光谱如图 5(扫描范围为 50 nm)和图 6(扫描范围为 2 nm)所示。

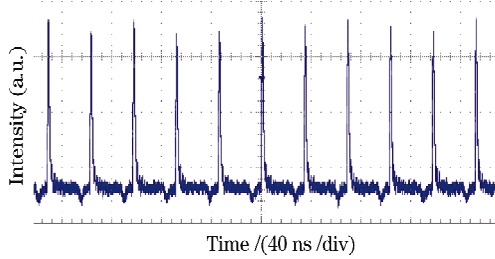


图 3 种子源输出的锁模脉冲波形

Fig. 3 Time domain response of the seed laser mode locking pulse

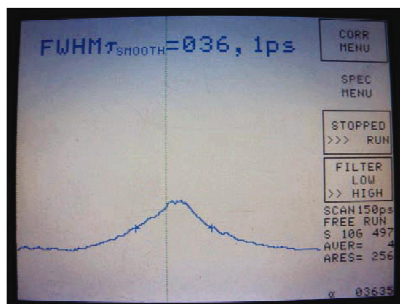


图 4 测量得到的脉冲自相关迹

Fig. 4 Self-correlation trace of the laser pulse

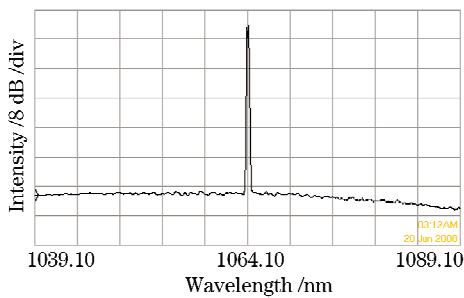


图 5 扫描范围为 50 nm 时得到的光谱图

Fig. 5 Spectrum with 50 nm scanning range

由图 6 可见,在激光中心波长处有一个小凹陷,这是由于 FBG 在此处的反射率很高所致。对于掺镱光纤激光器,输出腔镜采用反射率只有 4% 的光纤端面即可得到相当好的实验结果。据此估计,实验中使用的 FBG 高达 94.3% 的反射率远超过了激光器的最佳反射率。但由于 SESAM 的存在造成该

激光腔中锁模的形成,激光起振模式会由 FBG 峰值反射率处向附近反射率较低的波长处扩展,导致得到的激光光谱宽度比 FBG 本身的带宽要宽。由于掺镱光纤的增益比较高,FBG 峰值附近比较宽的一个范围内的波长(超过 FBG 带宽)所具有的反射率都足以导致激光腔内的光强达到饱和状态,因此在锁模的状态下,激光腔内在这一波长范围之内的模式所具有的功率大小都相差不多。这些模式的光在通过 FBG 后到达输出端时便会得到如图 6 所示的输出光谱,图中凹陷两侧两个峰值波长处的反射率对应激光器的最佳反射率。如果选取带宽较宽且反射率较低的 FBG 作为腔镜,应该可以避免这种凹陷的出现。

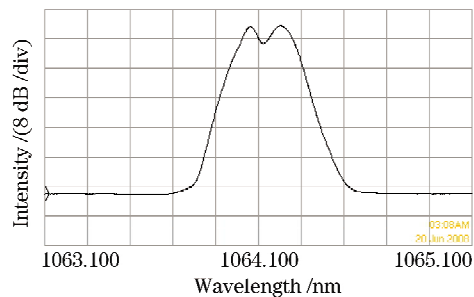


图 6 扫描范围为 2 nm 时得到的光谱图

Fig. 6 Spectrum with 2 nm scanning range

图 7 为种子源输出功率随抽运功率变化的曲线图。可见在抽运功率较低时,输出功率随着抽运功率的增加逐渐增加且增加的幅度亦随之变大(即曲线的斜率逐渐增大),而当抽运功率达到 100 mW 后,输出功率随抽运功率的增加线性上升。这是因为在较低抽运功率下,随着抽运功率的升高,实现锁模的模式数逐渐增多,使得输出功率上升的速度加快。而当抽运功率达到一定值以后,由于 FBG 带宽的限制,实现锁模的模式数不再增加,此时输出功率便会随抽运功率的增加线性上升。

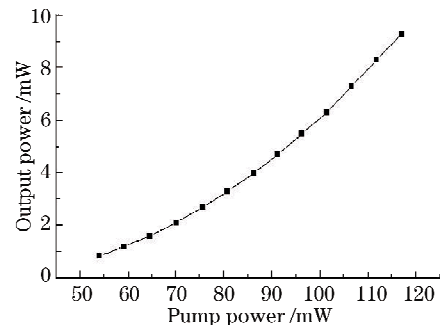


图 7 种子源部分输出功率随抽运功率的变化

Fig. 7 Output power versus pump power of the seed source

当种子源的输出功率为 5.5 mW, 放大器抽运功率为 308 mW 时, 一级放大器部分的最大平均输出功率为 108 mW。通过示波器测得的锁模脉冲时域特性如图 8 所示。一级放大器输出功率随抽运功率的变化曲线如图 9 所示。与种子源部分相比, 一级放大器输出功率随抽运功率的变化曲线线性度较好, 因为这一部分不存在模式数随抽运功率变化的情况。

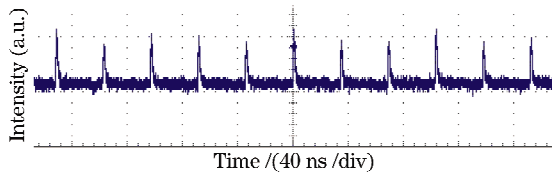


图 8 经过一级放大后输出的锁模脉冲波形

Fig. 8 Time domain response of the pulse laser after the preamplifier

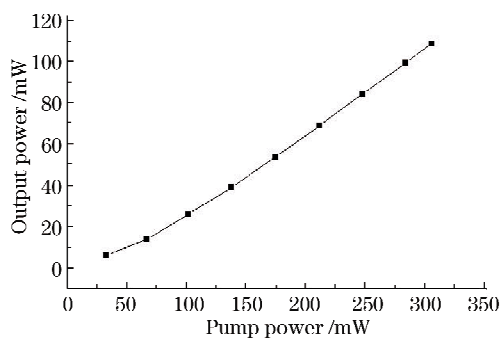


图 9 一级放大器部分输出功率随抽运功率的变化

Fig. 9 Output power versus pump power of the preamplifier

当种子源功率为 5.5 mW, 一级放大器抽运功率为 249 mW 时, 二级放大器部分在 4 W 多的抽运功率下, 得到的最大平均输出功率为 1.9 W。通过示波器测得的锁模脉冲如图 10 所示。二级放大部分输出功率随抽运功率的变化曲线如图 11 所示。与种子源一样, 在低抽运功率下输出功率随抽运功率增加的速度(即曲线斜率)会逐渐变大, 而在高抽运功率下输出功率随抽运功率的增加线性增加。虽然这一现象与种子源中观察到的现象极其相似, 但产生的原因却不同。此处曲线斜率变化是由 LD 温度的变化引起的。二级放大部分采用的抽运源不带温控和波长稳定系统, 随着驱动电流的加大, 抽运功率逐渐升高, LD 的温度也会不断升高, 导致其输出波长增加, 逐渐向 976 nm 逼近。由于掺镱光纤的吸收峰值在 976 nm, 因此 LD 波长向 976 nm 逼近会使得吸收效率增加。因而抽运效率提高, 输出功率随抽运功率增加的趋势也加快。但只要 LD 波长

足够接近 976 nm, 吸收效率便会保持不变, 因此在高抽运功率下放大器输出功率特性曲线的斜率会保持不变。

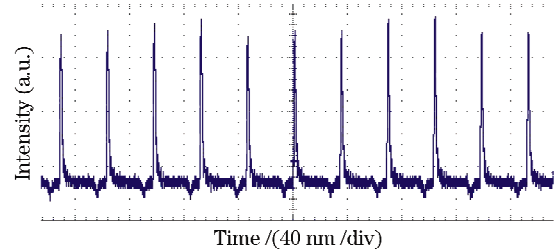


图 10 经过二级放大后输出的锁模脉冲波形

Fig. 10 Time domain response of the pulse laser after the power amplifier

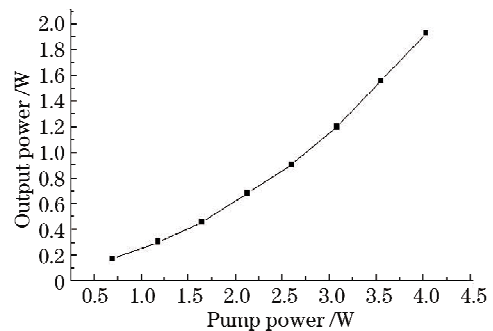


图 11 二级放大器部分输出功率随抽运功率的变化

Fig. 11 Output power versus pump power of the power amplifier

从示波器得到的输出锁模脉冲时域图可以看出, 种子源输出脉冲波形有一定波动(见图 3), 其可能原因如下: 1) 由于构成激光谐振腔的各种元器件(尤其是光纤光栅与 SESAM)对偏振都有一定程度的依赖性, 导致种子源激光腔对偏振比较敏感。而环境(如气流、振动等)的变化又容易引起光纤偏振态的改变, 造成激光器工作状态的起伏, 进而使得输出脉冲幅度的均匀性下降; 2) 光纤光栅带宽较窄对锁模不利, 也会导致输出不稳; 3) 从图 6 可见光纤光栅反射率偏高, 没有位于激光腔镜的最佳反射率附近, 导致激光器运转不稳定; 4) 种子源抽运 LD 的输出功率和输出波长都有一定程度的起伏, 导致其输出脉冲不稳定。综上, 若能采用更加稳定的 LD 对种子源进行抽运, 同时采用带宽较宽且反射率较低的光纤光栅作为腔镜, 并使整个种子源处于相对密闭的环境中, 相信可以使锁模脉冲变得更加稳定。在实验中, 通过仔细调节偏振控制器, 可以得到比图 3 所示更为稳定的脉冲输出。但是只要光纤被触动, 即使回复到原位置也会造成锁模脉冲波形的波动。因此, 实际使用过程中最好对种子源采用密闭

性固定封装,或者采用全保偏光纤器件搭建种子源。由图 8 和图 10 可见,种子源的这种不稳定经过放大器后变得更为明显,这一方面是由于这种功率起伏被放大器放大,另一方面可能也是由于放大器部分的抽运源功率和波长起伏所致。

由于色散展宽等因素的影响,在放大级后得到的脉冲宽度有一定程度的展宽,但展宽的幅度较小。初步的实验结果表明,这种展宽与光纤的长度和激光的功率都有关系。

## 4 结 论

研究了 MOPA 结构的皮秒脉冲掺镱光纤激光器。种子源是利用 SESAM 和光纤光栅构建的简单直腔、自启动、被动锁模掺镱光纤激光器,第一级放大器采用普通单模掺镱光纤放大器,第二级放大器采用双包层掺镱光纤放大器。种子源和第二级放大器输出功率随各自抽运功率上升的趋势相同:在低抽运功率时,输出功率随抽运功率的增加非线性上升;在高抽运功率时,输出功率随抽运功率的增加线性上升。种子源中的这一现象是由激光腔中起振模式增加造成的,而二级放大器中的这一现象是由抽运源波长变化引起的。种子源输出光谱在激光中心波长处有一凹陷,是由所用光纤光栅反射率太高且带宽较窄引起的。该激光器最终输出平均功率为 1.9 W,激光中心波长为 1064 nm,重复频率为 29.6 MHz。

## 参 考 文 献

- Dennis Gapontsev. 6 kW CW single mode ytterbium fiber laser in all-fiber format[C]. Solid State and Diode Laser Technology Review (SSDLTR) in Albuquerque, New Mexico, 2~5 June, 2008
- 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 Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(9): 1013~1015
- Lin Dongfeng, Chen Shengping, Hou Jing *et al.*. Ultrashort pulsed fiber sources in MOPA configurations [J]. *Optoelectronic Technology*, 2008, **28**(4): 275~282
- 林东风, 陈胜平, 侯 静 等. MOPA 结构的超短脉冲光纤光源 [J]. *光电子技术*, 2008, **28**(4): 275~282
- Xue Yuhao, Zhou Jun, Lei Siyuan *et al.*. The research development of fiber-based high average power ultrashort pulse amplification [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(11): 28~34
- 薛宇豪, 周 军, 雷思远 等. 高平均功率超短脉冲激光光纤放大研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(11): 28~34
- Hu Shuling, Lu Fuyun, Dong Fajie *et al.*. The progress of ultrashort fiber laser[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2004, **21**(15): 571~576
- 胡姝玲, 吕福云, 董法杰 等. 超短脉冲光纤激光器的研究进展 [J]. *量子电子学报*, 2004, **21**(15): 571~576
- Huang Xiujiang, Liu Yongzhi, Sui Zhan *et al.*. Development and application of ultrafast pulse fiber laser[J]. *J. Applied Optics*, 2004, **25**(6): 16~21
- 黄绣江, 刘永智, 隋 展 等. 超短脉冲光纤激光器新进展及其应用[J]. *应用光学*, 2004, **25**(6): 16~21
- Tu Chenghou, Lei Ting, Zhu Hui *et al.*. Development progress of high energy and wave-breaking-free ultra-short pulse optical source[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(4): 304~307
- 涂成厚, 雷 霆, 朱 辉 等. 高能量、无波分裂的超短脉冲光源的研究进展[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(4): 304~307
- S. Maryashin, A. Unt, V. P. Gapontsev. 10 mJ pulse energy and 200 W average power Yb-doped fiber laser [C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 610200
- Liu Yange, Zhang Chunshu, Sun Tingting *et al.*. Clad-pumped Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>-codoped short pulse fiber laser with high average power output exceeding 2 W [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(9): 4679~4685
- 刘艳格, 张春书, 孙婷婷 等. 输出平均功率大于 2 W 的高功率、包层抽运、超短脉冲掺镱共掺光纤激光器[J]. *物理学报*, 2006, **55**(9): 4679~4685
- Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. 39 fs, 16 W all photonic crystal fiber laser system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 811~814
- 刘博文, 胡明列, 宋有建 等. 39 fs, 16 W 全光子晶体光纤飞秒激光系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 811~814
- L. F. Kong, Q. H. Lou, J. Zhou *et al.*. 133 W pulsed fiber amplifier with large mode area fiber [J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(1): 010502
- Ding Guanglei, Shen Hua, Yang Lingzhen *et al.*. ps fiber amplifier and gratings compressor [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(7): 976~978
- 丁广雷, 沈 华, 杨玲珍 等. ps 级脉冲光纤放大器和压缩机 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(7): 976~978