

单端光纤耦合的声光调 Q 全光纤化光纤激光器

何 晶^{1,2} 赵宏明¹ 周 军¹ 杜松涛¹ 董景星¹ 魏运荣¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)
²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 实现了一种单端光纤耦合的高重复频率、窄脉冲、窄线宽及高效率的主动声光调 Q 全光纤脉冲光纤激光器。该光纤激光器基于光纤光栅与平面镜组合而成的线性法布里-珀罗(F-P)腔结构,采用激光二极管与(2+1)×1 抽运耦合器形成后向抽运,并利用单端光纤耦合声光调制器(AOM)实现了全光纤化结构的脉冲掺镱双包层光纤激光器。调 Q 声光开关工作在一级方向,反向输出调 Q 脉冲,重复频率 20~100 kHz 可调。在重复频率 50 kHz、抽运功率 5.7 W 下系统获得了输出激光功率 2.64 W、单脉冲能量 528 μJ、脉宽 56 ns、峰值功率 943 W 的稳定的高效率、窄线宽的窄脉冲,中心波长在 1080 nm 左右,线宽为 0.06 nm,光-光转换效率高达 46%。

关键词 激光器;光纤激光器;声光调 Q;全光纤;高重复频率;窄脉冲

中图分类号 TN248.1;TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0502008

Single-Ended Fiber Coupled Acousto-Optic Q-Switched All-Fiber Laser

He Jing^{1,2} Zhao Hongming¹ Zhou Jun¹ Du Songtao¹ Dong Jingxing¹ Wei Yunrong¹

(¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A single-ended fiber coupled actively acousto-optic Q-switched all-fiber laser with high-repetition-rate, short pulse duration, narrow line-width and high efficiency is experimentally demonstrated. Based on the combination of fiber grating and plane mirror providing a linear Fabry-Perot (F-P) cavity, the fiber laser is working on the backward-pump scheme by use of laser diode and (2+1)×1 pump coupler, achieving all-fiber structured pulse ytterbium-doped double-clad fiber laser by adopting single-ended fiber coupled acousto-optic modulator (AOM). AOM operates in the first direction and inversely outputs, inverted output Q-switched pulse with repetition rate of 20~100 kHz adjustable. At the repetition rate of 50 kHz and pump power of 5.7 W, laser system outputs highly efficient, stable, narrow line-width short pulse of 2.64 W average power, corresponding to single pulse energy of 528 μJ, pulse duration of 56 ns and peak power of 943 W. The center wavelength of laser is around 1080 nm with line-width of 0.06 nm, and the optical-optical conversion efficiency is as high as 46%.

Key words lasers; fiber laser; acousto-optic Q-switched; all fiber; high repetition rate; short pulse duration

OCIS codes 140.3460; 140.3510; 140.3540; 140.3615

1 引 言

随着掺稀土离子光纤制造技术的成熟,光纤激光器以其波长范围宽、光束质量好、转换效率高、使用寿命长和结构紧凑等明显优于其他气体或固体激

光系统的特点,在激光器应用领域中占有越来越重要的地位,成为目前国际上的研究热点。脉冲光纤激光器能产生峰值功率非常高的巨脉冲,在通信、医疗、传感、材料、加工和军事等方面都有着重要的应

收稿日期: 2011-11-24; 收到修改稿日期: 2012-01-25

基金项目: 上海市自然科学基金(10ZR1433600)资助课题。

作者简介: 何 晶(1987—),女,博士研究生,主要从事高功率脉冲光纤激光技术方面的研究。

E-mail: HJWendy87@gmail.com

导师简介: 周 军(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事高功率光纤激光器和准分子激光器等方面的研究。

E-mail: junzhou@siom.ac.cn(通信联系人)

用,也是光纤激光领域非常活跃且很有特色的研究方向。当前,光纤激光器振荡输出高功率、高光束质量、短脉冲激光的方式主要有调 Q 技术、锁模技术以及主振荡功率放大(MOPA)系统。其中调 Q 光纤激光器系统稳定,结构简单,产生的脉冲峰值功率非常高,在许多领域都有着重要的应用。

输出窄脉冲、高重复频率、高峰值功率的调 Q 光纤激光器是一个重要的发展方向^[1~3]。由于光纤增益介质较长,大多数光纤激光器都工作在较低的重复频率下,因此高重复频率的脉冲(几十千赫兹以上)建立比较困难;而且长光纤引入的长腔长使得脉冲宽度相对比较宽,大多在几百纳秒甚至微秒量级;同时由于光纤对于外界环境的敏感,较长的光纤也使得激光器的稳定性变差。为了获得稳定的高重复频率、高效率的窄脉冲激光,就需要缩短调 Q 光纤激光器的腔长,采用高掺杂的短光纤。因此有报道采用 1 m 甚至更短的光纤来获得高重复频率的窄脉冲^[4],更有新型的粗纤芯、高掺杂棒状光纤实现高功率、窄脉冲的输出^[5],但是声光调制器件以及耦合镜输出也给系统本身带来了一定的约束。

另一方面,正由于腔内加入的传统块状声光、电光调制器件限制了激光系统的便携性,为了突破固体光学器件对激光系统的制约,人们陆续开发出了一些新型的 Q 开关来代替体结构的声光与电光调制器,使得系统便于连接、集成化。其中最具代表性的是压电陶瓷附加在具有双臂的马赫-曾德尔干涉仪^[6],或者利用压电陶瓷附着在光纤上改变腔内损耗以产生调 Q 脉冲来实现全光纤化^[7~9]的报道。但是这些方式得到的激光峰值功率都不高,平均功率也很有限(毫瓦量级),难以达到高功率应用的要求。此外,人们发现可以利用光纤中的一些非线性效应在光纤激光器中实现自调 Q,这种自调 Q 光纤激光器是全光纤型的,无需任何主动调 Q 装置,曾一度引起了研究者的关注^[10~12]。但是,这样也对其他器件的灵敏度提出了很高的要求,使系统复杂化,不利于整体结构的稳定。带尾纤输入输出的声光调制器也可以解决固体器件与光纤连接的问题,但是尾纤的加入同样增加了激光器的腔长,使脉冲变宽,稳定性变差。

针对以上问题,本文提出了一种单端光纤耦合声光调制器、光纤输出的全光纤化主动调 Q 光纤激光器。该装置采用光纤光栅与平面镜组合而成的线性法布里-珀罗(F-P)腔结构,激光二极管(LD)与(2+1)×1 抽运耦合器实现后向抽运、单端以尾纤

耦合封装声光体器件。实验中研究了调 Q 声光开关一级衍射方向反馈、重复频率 20~100 kHz 可调时输出的各种脉冲特性。在重复频率 50 kHz、抽运功率 5.7 W 下系统获得了输出激光功率 2.64 W、单脉冲能量 528 μJ 、脉宽 56 ns 及峰值功率 943 W 的稳定脉冲输出。整个激光系统结构紧凑、小巧便携;光纤端的激光输出灵活方便,便于与各种光机系统兼容;其重复频率可调、可控性好,得到了高重复频率、窄脉冲、窄线宽及高效率的调 Q 脉冲输出,在作为 MOPA 系统的种子光源以及激光倍频等实验应用领域都有着广泛的实用前景。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。

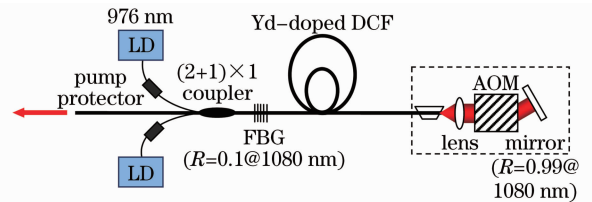


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

实验采用一段 3 m 长的八边形双包层高掺杂掺镱光纤(DCF)作为增益介质,其纤芯直径 10 μm ,内包层直径 130 μm ,纤芯有效数值孔径 0.08,对于波长为 975 nm 的光,包层吸收系数为 4.2 dB/m。为了抑制端面菲涅耳反射(4%)产生自激而引起放大自发辐射(ASE),掺杂光纤输出一端切成斜角(在 $8^\circ\sim 15^\circ$ 范围内),经过封装好的可调节透镜将光束准直进入声光调 Q 晶体。该 Q 开关由中国电子科技集团 26 所生产,工作波长为 1000~1100 nm,中心频率为 100 MHz。由于声光开关衍射效率的限制(约为 75%),若采用零级反馈,即直接将经过声光调制器(AOM)后未经偏转的光反馈回光纤,则在声光开关将激光偏转至一级时,本应具有最大腔损耗无反馈的零级方向此时还有 25%左右的光可以得到反馈,无疑大大降低了腔内的 Q 值,更引起 ASE 的增强,降低了输出脉冲质量。为了更好地改善声光调 Q 脉冲光纤激光器的输出脉冲并抑制 ASE,实验中将声光调制器设置在一级方向工作,让入射的准直平行光在一级衍射方向偏转,再经全反射平面镜(反射率在 1080 nm 波长时为 99.9%)反射回光纤进行反馈。掺镱光纤的另一端熔接了一个对 1080 nm 激光反射率为 10%的双包层光纤光栅,带宽 0.1 nm,

纤芯直径/外包层直径为 $10\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$ ，纤芯数值孔径 0.08，不仅对激光输出起到了有效的波长选择、窄带滤波作用，还作为激光谐振腔的前腔镜。

两只 976 nm 波长稳定的 ALFALIGHT 半导体激光器作为抽运源。每只管子带单根纤芯直径 $105\ \mu\text{m}$ 的多模尾纤输出，纤芯数值孔径 0.22，输出激光中心波长位于 976 nm，谱宽 1 nm 左右，对应 Yb^{3+} 吸收谱最大吸收截面所对应的波长。LD 输出尾纤首先接入抽运保护器，用于防止反馈回来的高峰值激光损坏 LD 抽运源；通过 $(2+1)\times 1$ 耦合器耦合进入低反射率的光纤布拉格光栅 (FBG) 光纤，形成后向抽运的激光器。

当调 Q 光纤激光器的声光开关关闭时，激光器处于能量存储状态；当声光开关打开时，工作在一级衍射部分的激光通过 $(2+1)\times 1$ 抽运信号耦合器的传输信号光的光纤输出。这种方式下，耦合器的信号输入纤反向输出激光，既提高了抽运光的转换效率，实现了高增益的腔内调 Q，又使输出光中抽运光残余量大大减小，让激光光谱得到一定的改善，也实现了光纤输出。由于整个耦合透镜、声光调制器及高反镜封装成了一个集输入、输出为一体的模块，避免了加入输出端口后再次引入光纤，有效地缩短了腔长，更增加了系统的集成性、紧凑性和实现了全光纤化的结构。

3 结果分析

实验采用快速光电探测管探测输出激光脉冲，将其连接到 Lecroy WR62XR 示波器来监测调 Q 脉冲波形；输出激光脉冲平均功率采用 Spectra-Physics 407 A 功率计测量；对激光光谱采用 Yokogawa Inc. AQ6370 Optical Spectrum Analyzer 测量。实验中，先固定激光脉冲的调制重复频率，而后调节信号发生器脉冲波形的高电平时间宽度来改变激光输出的打开时间（一级工作时间，即高电平时间），以实现稳定的重复频率及脉冲序列输出。依次采用这种方法，测量了不同重复频率下一级光输出的结果。

在抽运功率为 5.7 W 时，重复频率 50 kHz 下可得到平均功率 2.64 W，脉冲宽度 56 ns、峰值功率 943 W 的激光输出，光-光转换效率为 46%；抽运功率为 3.79 W、重复频率为 20 kHz 时，得到了平均功率 1.71 W、脉冲宽度 39.5 ns、峰值功率 2162 W 的稳定输出脉冲，光-光转换效率为 45%。图 2 给出了重复频率分别为 20、50、100 kHz 时得到的输出激光平均功率随抽运功率的变化曲线，相应的调 Q

脉冲宽度、峰值功率与抽运功率关系的曲线如图 3 所示。

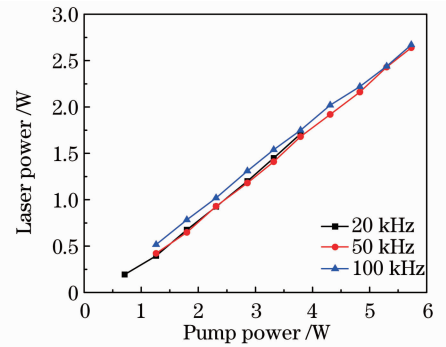


图 2 输出激光平均功率随抽运功率的变化关系

Fig. 2 Average power of output laser versus pump power

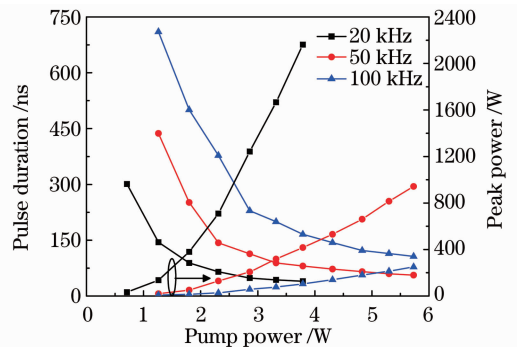


图 3 调 Q 脉冲宽度和峰值功率与抽运功率的关系

Fig. 3 Pulse duration and peak power of Q-switched pulse versus pump power

从图 2、3 中可以看出，相同的重复频率下，输出激光平均功率及脉冲峰值功率均随入纤抽运功率的增加而增大，而脉冲宽度开始急剧减小，最后趋向平缓。这是因为随着抽运入纤功率的逐渐提高， Yb^{3+} 上能级积累的反转粒子数逐渐增多，激光器的初始增益和光脉冲增长速率变大，从而导致脉冲平均功率近似线性增高，脉宽急剧压缩，脉冲峰值功率迅速变大；当抽运功率增高到一定程度，反转粒子数趋于饱和，使得脉宽的变化率减小。随着重复频率（20 kHz 以上）的增加，同等抽运条件下的功率增加趋势越来越平缓，趋近于连续输出时的激光功率。在相同的抽运功率下，脉冲的重复频率越高，输出脉冲的平均功率越高，获得的脉冲宽度也越宽，而峰值功率越小。这是由于在较高重复频率下，单位时间内激光脉冲提取效率比较大，输出激光的平均功率变大；脉冲的重复频率越高，调 Q 时的单个脉冲能量积累时间由于周期缩短而相应缩短，从而使激光器的初始增益变小，调 Q 脉冲的建立时间延长，输

出脉宽增大,脉冲峰值功率下降。在较低抽运功率时,不同重复频率下峰值功率的差异很小,随着抽运功率增加,调 Q 脉冲峰值功率增加得越来越快,差距也越来越大。

调 Q 光纤激光器中常见的寄生在脉冲中的自锁模现象与非线性效应是影响声光调 Q 光纤激光器输出稳定性的因素之一,使得输出的激光脉冲形状有毛刺而不平滑或者脉冲形状畸变^[7~9]。表现为观察到的调 Q 脉冲中附带着一种周期调制,调制周期与激光腔锁模时的周期相同,均为 $T_r/2$ (T_r 为调 Q 光纤激光器往返腔长时间)。实验中可以观察到明显的自锁模现象,且较低的抽运功率下调 Q 脉冲的锁模调制深度要高于较高抽运功率时的锁模调制深度。随着抽运功率的增加,调 Q 脉冲光中的“锁模”现象逐渐减弱,可以得到比较干净的脉冲形状。而当抽运功率继续升高到一定程度时,由于非线性效应[如自相位调制(SPM)],输出激光脉冲会出现一定畸变。这种现象在较低重复频率时更加明显,更低的激光功率下就已经开始出现脉冲畸变。

图 4 是 0.7 W 低抽运入纤功率时脉宽为 545.2 ns 的单脉冲波形,可见低功率下有比较明显的“锁模”现象;图 5 给出了抽运入纤功率为 5.3 W、50 kHz 重复频率下截获的单个脉冲波形图(脉宽为 59.6 ns),图 6 给出了该状态下的脉冲序列波形,从图 5、6 中可看出较高抽运功率时脉冲形状整齐干净,常见的“锁模”毛刺被抑制,脉冲序列也比较稳定,抖动性在 10% 以内。此时输出激光光谱如图 7 所示,可以看出激光中心波长在 1080 nm 左右,线宽在 0.06 nm 左右。

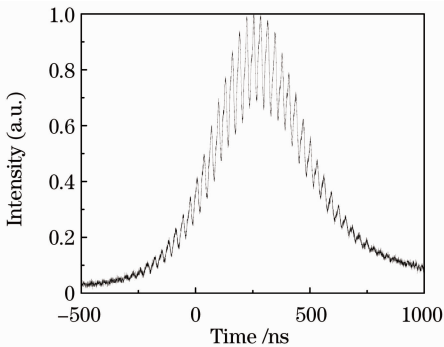


图 4 0.7 W 入纤功率下输出的锁模脉冲
Fig. 4 Mode-locking pulse under 0.7 W pump power

声光调制器的一级衍射工作时间宽度的大小对输出脉冲的稳定性很重要,当调节脉冲信号发生器的脉冲宽度时,声光开关的时间宽度也随之改变。特别是低抽运功率下,输出激光脉冲的稳定性随声

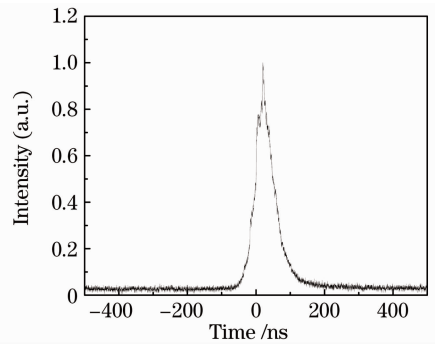


图 5 5.3 W 入纤功率下输出的调 Q 脉冲波形(50 kHz)
Fig. 5 Q-switched pulse under 5.3 W pump power (50 kHz)

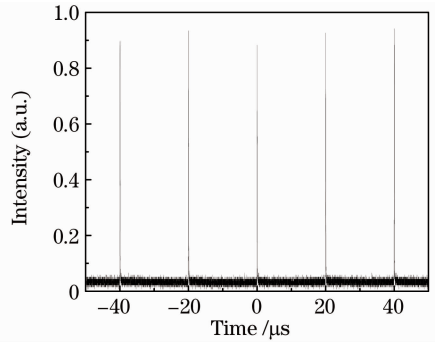


图 6 光纤激光器输出脉冲序列(50 kHz)
Fig. 6 Pulse-train of Q-switched fiber laser (50 kHz)

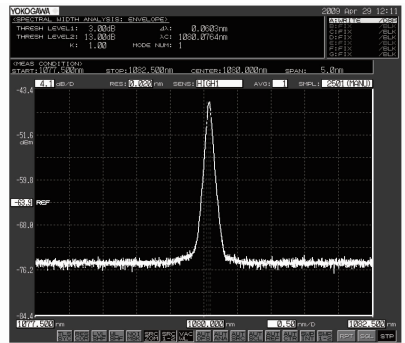


图 7 输出激光光谱图

Fig. 7 Spectrum of output laser

光工作时间宽度变化更为灵敏。实验采用示波器监测输出脉冲,发现重复频率越高,需要的脉冲建立时间越长,所需要的声光开关时间也越长。当抽运功率为 0.7 W、重复频率为 100 kHz,开关时间为 9.84 μ s 时激光器输出稳定的 100 kHz 调 Q 脉冲;随着时间门宽度的缩短,激光器出现了稳定的输出重复频率在 50 kHz 脉冲的“半频”效应;时间门宽度再缩短,之后又出现了 33 kHz 的脉冲。这是由于低功率抽运下,光纤介质的增益低,并且脉冲建立时间比较长,这是与声光一级衍射工作时间相比拟引起的。当缩短声光开关打开时间时,光纤激光器

的能量积累时间相应延长了,因而更容易建立调 Q 脉冲;同时脉冲振荡时间(即声光开关打开时间)缩短了,脉冲的建立时间也被缩短了。这也导致了在高重复频率调制下,输出的调 Q 脉冲不稳定。当不断减少的建立时间小于不断减少的声光开关打开时间时,就能容易地输出稳定的调 Q 脉冲。进一步提高抽运功率,实验发现输出脉冲与脉冲的稳定性也随之提高。

4 结 论

基于优化调 Q 光纤激光脉冲参数、集成小型化激光器结构的思想,采用 $(2+1)\times 1$ 抽运耦合器实现 LD 耦合后向抽运高掺杂双包层光纤激光的技术,利用窄带 FBG 有效控制输出激光光谱、单端模块化封装的形式构建了一台结构紧凑的声光主动调 Q 全光纤化的光纤激光器,有效地缩短了激光器的腔长,突破了一般调 Q 光纤激光器面临的长脉冲、低重复频率和脉冲分叉等问题,得到了窄线宽、高重复频率可调、高稳定性及高效率的调 Q 窄脉冲。当重复频率 50 kHz、抽运功率 5.7 W 时,实现了输出激光功率 2.64 W、单脉冲能量 528 μJ 、脉宽 56 ns、峰值功率 943 W 的稳定调 Q 激光脉冲输出,中心波长在 1080 nm 左右,线宽为 0.06 nm,光-光转换效率高达 46%。在实验研究中,通过对激光的平均功率、脉冲宽度、峰值功率等各项指标参数进行比较,分析了其特性和变化规律。由于单端模块的封装有效地缩短了腔长,减小了体积,整个激光系统结构小巧便携;激光由光纤端输出,便于与各种光机系统兼容;其重复频率可调、可控性好,得到的高质量调 Q 脉冲输出,在作为 MOPA 系统的种子光源以及激光

倍频等实验应用领域均有着广泛的实用前景。

参 考 文 献

- 1 Hongming Zhao, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. Stable pulse-compressed acousto-optic Q-switched fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(19): 2774~2776
 - 2 Hongming Zhao, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. An acousto-optic Q-switched fiber laser using China-made double-cladding fiber [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(9): 522~523
 - 3 Bo Peng, Qiang Liu, Mali Gong *et al.*. Acousto-optic Q-switched cladding-pumped ytterbium-doped fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 415~417
 - 4 Y. X. Wang, D. Z. Yang, P. P. Jiang *et al.*. Linearly polarized Q-switched pulse Yb fiber laser with average output power over 10 W[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2009, **6**(6): 461~464
 - 5 J. Limpert, N. Deguil-Robin, S. Petit *et al.*. High-power Q-switched Yb-doped photonic crystal fiber laser producing sub-10 ns pulses[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **81**(1): 19~21
 - 6 Shumin Zhang, Fuyun Lu, Jian Wang. All-fiber actively Q-switched $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped ring laser [J]. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2007, **49**(9): 2183~2185
 - 7 Bo Peng, Mali Gong, Ping Yan *et al.*. Q-switched fiber laser by all-fiber piezoelectric modulation and pulsed pump [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(10): 2066~2069
 - 8 Matthew Leigh, Shi Wei, Zong Jie *et al.*. Compact, single-frequency all-fiber Q-switched laser at 1 μm [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(8): 897~899
 - 9 M. DelgadoPinar, D. Zalvidea, A. Diez *et al.*. Q-switching of an all fiber laser by acousto-optic modulation of a fiber Bragg grating[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(3): 1106~1112
 - 10 P. Myslinski, J. Chrostowski, J. A. Koningstein *et al.*. Self-mode locking in a Q-switched erbium-doped fiber laser[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(3): 286~290
 - 11 Y. Wang, A. Martinez-Rios, H. Po. Analysis of a Q-switched ytterbium-doped double-clad fiber laser with simultaneous mode locking[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **224**(1-3): 113~123
 - 12 Feng Xiaoxing, Chen Bo, Zhu Yi *et al.*. Study of self mode-locking in Q-switched and continuous working Yb-doped fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7): 873~877
- 冯小星, 陈 柏, 朱 毅等. 调 Q 及连续掺 Yb 光纤激光器中的自锁模研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7): 873~877