

文章编号: 0258-7025(2010)03-0622-05

Er/Yb 共掺双包层全光纤激光器的实验研究

任 芳¹ 向望华^{1,2} 祖 鹏¹ 白扬博¹ 李 楠¹ 伍成强¹ 师晓宙¹ 张贵忠^{1,2}

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; ² 天津大学光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 报道了 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺双包层光纤作为增益介质的全光纤环形腔激光器。用性能稳定, 中心波长为 976 nm 的高功率半导体激光器作为抽运光源, 利用光纤的非线性偏振旋转效应产生可饱和吸收体的锁模机制, 通过调整抽运功率和偏振控制器的状态, 实现了被动调 Q, 调 Q-锁模和连续锁模的运转状态, 其中调 Q 重复频率 7.583~32.86 kHz, 连续锁模重复频率为 8.843 MHz。实验还观察到各种运转状态的光谱都为带状光谱, 对这种现象进行了简单的分析。

关键词 光纤激光器; 被动锁模; 非线性偏振旋转; 双包层光纤; 环形腔

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103703.0622

Experimental Study on Er/Yb Co-Doped Double-Clad All Fiber Laser

Ren Fang¹ Xiang Wanghua^{1,2} Zu Peng¹ Bai Yangbo¹ Li Nan¹

Wu Chengqiang¹ Shi Xiaozhou¹ Zhang Guizhong^{1,2}

¹ College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

² Key Laboratory of Optoelectronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract An all fiber ring laser with a small segment of Er³⁺/Yb³⁺ co-doped double-clad fiber as gain medium, pumped by a stable 976 nm high power laser diode, is experimentally demonstrated. Using mode-locked mechanism by nonlinear polarization rotation technique, adjusting the polarization controllers orientations and pump, the stable operations of passive Q-switched, Q-switched-mode-locked and continual mode-locked were obtained experimentally. The pulse repetition rate of Q-switched is from 7.583 kHz to 32.86 kHz and the pulse repetition rate of continual mode-locked is 8.843 MHz. We also observed ribbon spectrum and analyzed the result simply.

Key words fiber laser; passive mode-locked; nonlinear polarization rotation; double-clad fiber; ring cavity

1 引 言

双包层光纤激光器是一种新型激光器, 与一般的固体激光器相比, 它具有散热面积大、抽运效率高和阈值低等优点。普通单模光纤的纤芯只有几微米, 所以抽运功率耦合进纤芯的效率很低, 用大功率抽运光抽运受到限制, 普通单模光纤即使实现锁模, 它的输出功率仅有几个毫瓦到几十个毫瓦。双包层光纤由纤芯、内包层、外包层和保护层构成, 比常规的普通光纤多一个内包层, 如果用双包层增益光纤, 内

包层的数值孔径比纤芯大得多, 所以用大功率抽运光抽运, 抽运光在内包层与纤芯中传输, 这样就可以获得大的输出功率, 一般从几百毫瓦到瓦量级。并且, 在光纤中掺入 Er³⁺ 离子的同时共掺入敏化剂 Yb³⁺ 离子能够降低 Er³⁺ 离子产生的浓度淬灭效应^[1], 提高了抽运耦合效率和转换效率, 从而大大地提高了激光的输出功率。因此, 随着波分复用(WDM)技术的迅速发展, 这种功率输出高的 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺双包层光纤激光器将满足人们对瓦量级通信波长激光光源的

收稿日期: 2009-05-13; 收到修改稿日期: 2009-06-07

基金项目: 天津市科委基金(07JCYBJC06100)和高等学校博士学科点专项科研基金(20050056004)资助课题。

作者简介: 任 芳(1984—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器与光通信等方面的研究。E-mail: renfang1@163.com

导师简介: 向望华(1947—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事超短激光与光通信等方面的研究。

E-mail: whxiang@tju.edu.cn

需求,成为光通信中的常用器件之一。

国内外学者对 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双包层光纤激光器展开了大量的研究。在国外,1998 年 M. Hofer 等^[2]报道了 1 W 激光二极管(LD)抽运的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤直线型腔激光器,利用可饱和吸收效应获得了重复频率为 30 MHz 的被动锁模脉冲序列。2007 年 J. Y. Huang 等^[3]报道了掺 Yb^{3+} 双包层光纤直线型腔激光器,利用半导体可饱和吸收体效应(SESAM)获得了被动调 Q 脉冲序列,在抽运功率为 17.5 W 时调 Q 重复频率为 48 kHz。2008 年 Andreas E. H. Oehler 等^[4]报道了 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤直线型腔激光器,利用 SESAM 获得了重复频率为 100 GHz 的被动锁模脉冲序列。在国内,主要有南开大学和空军工程大学等对其展开了相关的研究,其研制的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤激光器输出功率达到瓦量级^[5~8]。2007 年张书敏等^[9]报道了 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤环形腔激光器,利用马赫-曾德尔干涉仪获得了重复频率从几赫兹到 25 kHz 的主动调 Q 脉冲序列。目前,在国内关于 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤激光器被动锁模的文章未见报道。

本文报道了采用 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤作为增益介质,利用非线性偏振旋转效应作为可饱和吸收体的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤环形腔激光器的实验研究结果。在实验中,观察到了被动调 Q,调 Q-锁模,连续锁模脉冲序列,本文介绍了这些实验结果并简单地分析了其实验原理。

2 实验装置及原理

$\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤环形腔激光器的实验装置如图 1 所示,激光器主要由偏振相关隔离器(ISO1),976/1550 nm 波分复用器,偏振控制器(PC1, PC2),耦合比为 50:50 的输出耦合器, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤组成,腔长为 20.6 m,整个环形腔均采用全光纤器件,以保证光在全光纤环境下连续运转而不受外界环境的影响。实验中所用的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤长度为 1 m,数值孔径(NA)为 0.22,纤芯/包层尺寸为 10.10/130 μm 。采用中心波长为 976 nm 的高功率半导体多模激光器抽运,其最大尾纤输出功率为 6.5 W。同时,为了避免抽运源损坏,在抽运激光器的输出端接入高功率的抽运源保护滤波器(ISO2)。在输出端使用连接有硅快速光电探测器的带宽为 200 MHz 的 Tek 数字示波器(TDS2022B)观测激光输出的时域特性,使用多功能光谱分析仪

(Anritus MS9001A)观测激光的频谱特性,使用微功率计 AI9402A 测量激光输出功率。

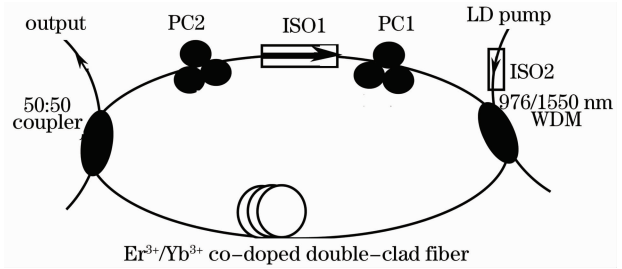


图 1 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤环形腔激光器实验装置

Fig. 1 Configuration of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped double-clad fiber ring cavity laser

光纤环形腔激光器非线性偏振旋转被动调 Q,锁模的工作原理^[10]是:由偏振相关光纤隔离器出来的线偏振光经过第一个偏振控制器后变为椭圆偏振光,该椭圆偏振光可以认为是两个相互垂直的、具有不同强度的线偏振光的合成。当椭圆光经过 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤得到增益的放大时,由于光纤的非线性效应(Kerr 效应),使得两个互相垂直的偏振分量经过相同长度的光纤所产生的非线性相移不同,从而使椭圆偏振光的偏振状态发生改变。第二个光纤偏振控制器的作用主要是调整光脉冲的偏振方向使与偏振相关隔离器的偏振方向一致,使得光脉冲的峰值得到通过,而光脉冲的两翼由于有较大的损耗而被削掉,最后导致光脉冲发生窄化。光脉冲在腔内往返多次之后变窄,其作用相当于可饱和吸收体。

考虑单程环路中,若光纤线性损耗与增益较小,根据 Haus 理论^[11],描述光纤环形腔激光器的锁模动力学方程为

$$\left[-j\psi + (g - \alpha) + \frac{g}{\Omega_g} \frac{d^2}{dt^2} + jD \frac{d^2}{dt^2} + (\gamma - j\sigma) |A|^2 \right] A = 0, \quad (1)$$

其中 A 为脉冲包络振幅, ψ 为光脉冲非线性相移, α 为单程线性损耗, Ω_g 为增益带宽, g 为光纤增益系数, D 为光纤色散系数, γ 为光纤中非线性偏振旋转效应产生的自幅度调制系数, σ 为非线性自相位调制系数。(1)式的解析解为

$$A = A_0 \left\{ \sec \left[h \left(\frac{t}{\tau} \right) \right] \right\}^{(1+i\eta)}, \quad (2)$$

式中 η 为啁啾参数, τ 为归一化脉冲宽度。将(2)式代入(1)式,可以得到脉冲啁啾参数和脉冲宽度的具体表达式为

$$\eta = -\frac{3}{2} \frac{\sigma D_n - \gamma}{\sigma + \gamma D_n} \pm \left[\left(\frac{3}{2} \frac{\sigma D_n - \gamma}{\sigma + \gamma D_n} \right)^2 + 2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

$$\tau = \frac{-2D_n - 3\eta + D_n\eta^2}{\sigma}, \quad (4)$$

式中 $D_n = (\Omega_g^2/g)D$ 为归一化色散参量。由(3),(4)式表明,利用非线性偏振旋转锁模技术实现的光纤激光器,其输出脉冲不可能为变换极限脉冲,而是啁啾脉冲(由于 η 不为零)。激光器输出的脉冲宽度 τ 不仅与脉冲自相位调制效应 σ , 非线性偏振旋转效应产生的自幅度调制效应有关,而且与光纤环形腔总净色散有关。

3 实验结果及分析

在实验中,通过改变抽运功率的大小,调整偏振控制器(PC1,PC2)的位置,Er³⁺/Yb³⁺共掺双包层光纤环形腔激光器得到了调Q,调Q-锁模和连续锁模脉冲序列。

3.1 调Q脉冲序列

实验中,首先将抽运光设定在较低的功率状态下,精心调节偏振控制的位置,同时尽量降低和减少腔内

的各种损耗(弯曲损耗、焊接损耗等),在调节过程中通过示波器观察光纤激光器的输出特性。当偏振控制器在某一状态时,可以得到稳定的脉冲序列输出,它的脉冲周期和幅度十分均匀,而且极其稳定,与锁模脉冲序列不同之处在于它的周期短,所得脉冲序列为调Q脉冲序列。保持此时的偏振控制器状态不变,小心调节抽运功率大小,发现阈值抽运功率为0.5 W时,输出脉冲平均功率为0.1 mW,并且其最大抽运功率为2.3 W,当再增加抽运功率时激光器输出调Q-锁模脉冲序列,但当再改变偏振控制器的位置时,得到调Q脉冲序列的最大抽运功率发生变化。图2是抽运功率为1.1 W时的调Q脉冲序列图及相应的光谱图,其重复频率为14.74 kHz,输出功率为16.4 mW。实验中,发现随着抽运功率的增大,调Q脉冲的重复频率也随之增加,振幅随之减小。由于调Q是一种损耗调制^[12,13],抽运功率的增加使得脉冲能量在减少。保持此时的偏振控制器状态不变,测定了调Q状态下双包层光纤环形腔激光器输出脉冲平均功率和重复频率随抽运功率变化的关系曲线,如图3所示。

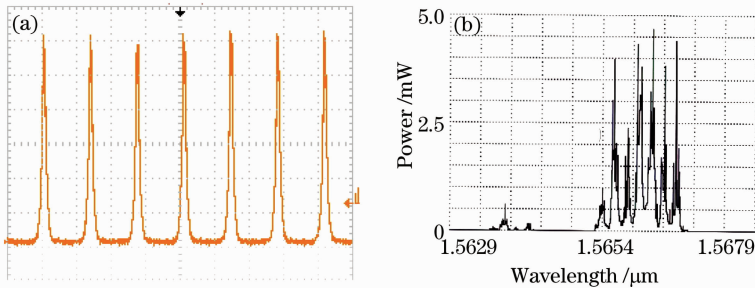


图2 光纤激光器调Q脉冲序列(a)及其光谱图(b)

Fig. 2 Q-switched pulse trains (a) and output spectrum (b) of fiber laser

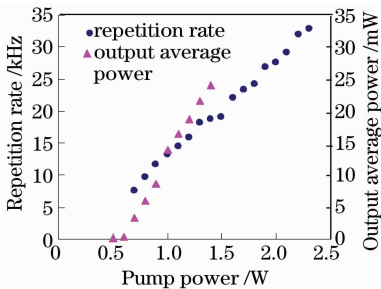


图3 光纤激光器输出平均功率和脉冲重复频率随抽运功率变化的关系曲线

Fig. 3 Output average power and pulse repetition rate of Q-switched versus pump power of fiber laser

3.2 调Q-锁模脉冲序列

当继续增大抽运光的功率,此时调Q状态随之消失,激光器工作在稳定的调Q-锁模状态。同时,改变

偏振控制器的位置,也观察到了调Q-锁模脉冲序列,其阈值抽运功率为0.6 W,激光器输出脉冲平均功率为3.62 mW。这种调Q-锁模现象实际上等效于腔内同时存在快、慢两种可饱和吸收体,因为在一个环形腔内非线性偏振旋转锁模是靠调整偏振控制器的状态使激光器产生锁模,而同时调整偏振控制器时,也等效于调整了腔内的增益与损耗,在增益和损耗调整到某种状态时,同时起到了调Q与锁模的双重功效,进而产生调Q-锁模脉冲输出。图4是抽运功率在1.2 W,输出脉冲平均功率为21.51 mW时调Q-锁模脉冲序列图及其相应的光谱图,其调Q包络重复频率为18.80 kHz,锁模脉冲重复频率为8.843 MHz。保持此时的偏振控制器状态,测得了调Q-锁模状态下光纤激光器输出功率随抽运功率变化的关系曲线,如图5所

示。实验中,抽运功率达到3.2 W时激光器输出开始出现锁模脉冲序列,同时还观察到,在不同的偏振状态下

出现稳定的调 Q-锁模脉冲序列的抽运功率范围不一样。

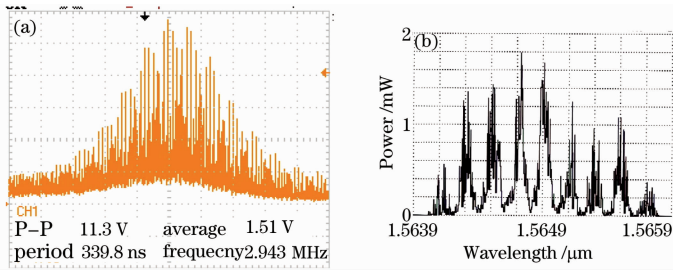


图 4 光纤激光器调 Q-锁模脉冲序列(a)及其光谱图(b)

Fig. 4 Q-switched-mode-locked pulse trains (a) and output spectrum (b) of fiber laser

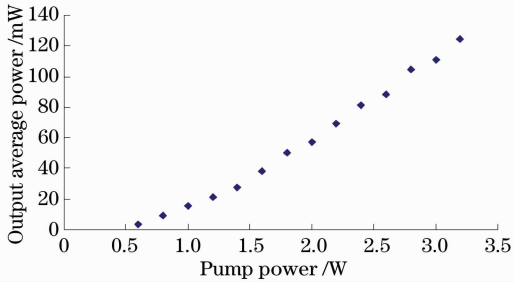


图 5 光纤激光器输出平均功率随抽运功率变化的关系曲线

Fig. 5 Output average power versus pump power of fiber laser

3.3 连续锁模脉冲序列

进一步增大抽运光功率,保持之前的偏振控制

器状态不变,得到连续锁模脉冲序列输出。改变偏振控制器的位置,同样观察到了连续锁模脉冲输出及其光谱图,其阈值抽运功率为 0.6 W,输出脉冲平均功率为 3.1 mW。图 6 是抽运功率在 1.1 W 时的连续锁模脉冲序列,脉冲输出平均功率为 17.4 mW,重复频率为 8.843 MHz。根据锁模原理中腔长与频率的关系 $f = c/nL$,可以得到,其光纤长为 20.6 m 时,对应的锁模重复频率为 8.843 MHz,与实际相符。实验中,还发现在某一偏振状态和抽运功率下,双包层光纤激光器输出的连续锁模状态是一个不稳定的状态,它与谐波脉冲(二次谐波、三次谐波等)交替出现,脉冲的幅度波动较大,如图 7 所示,出现这样的原因可能是失配的低阶谐波^[14]。在光纤激光器中幅值不等

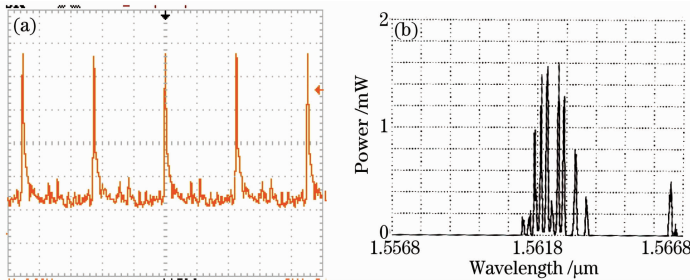


图 6 连续锁模脉冲序列(a)及其光谱图(b)

Fig. 6 Continuing mode-locked pulse trains (a) and output spectrum (b) of fiber laser



图 7 幅值不等的锁模脉冲序列

Fig. 7 Mode-locked pulse trains of different intensities

脉冲的产生机制在其他地方也有报道^[15]。图 8 是双包层光纤激光器连续锁模输出功率随抽运功率变化的关系曲线。

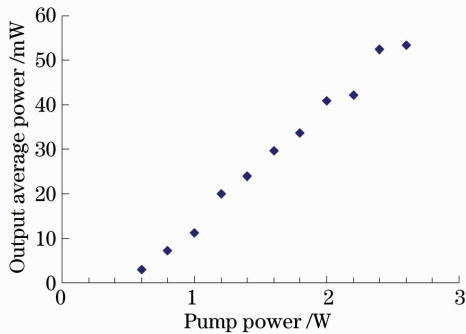


图 8 光纤激光器输出平均功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 8 Output average power versus pump power of fiber laser

在以上的实验中,发现双包层光纤激光器输出脉冲序列的光谱都是带状光谱,这种现象可能是由于与光纤激光器的输出耦合比有关^[7]:输出耦合比较高时,边模抑制比较高,光谱质量也较好,可以实现单模激光输出;当输出耦合比较低时,输出光束质量较差,出现多个激光谐振波长。本实验中,光纤激光器的输出耦合比是 50:50,因此出现带状的光谱图,这种现象可以认为是输出耦合比较低时,激光谐振腔内反馈较多的激光信号,模式竞争比较激烈,容易产生多个模式。

4 结 论

在 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层全光纤环形腔激光器中, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺与包层抽运技术相结合,利用非线性偏振旋转效应,在实验中观察到调 Q,调 Q-锁模和连续锁模脉冲序列的输出。在实验中,观察到调 Q 脉冲重复频率随着抽运光功率的大小而变化,连续锁模脉冲在同一偏振控制器状态和抽运功率下不是一个稳定的状态,各个输出状态的阈值抽运功率和抽运功率范围是随着偏振控制器的位置而变化的,但阈值抽运功率都有一个最低的值。

参 考 文 献

1 Jia Xiujie, Guo Zhancheng, Fu Shenggui *et al.*. Experimental investigation on co-doped double-clad high-power fiber laser in L-band[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(3): 341~345

贾秀杰,郭占城,付圣贵等. $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤的高功率 L-band 光纤激光器的实验研究[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(3): 341~345

2 M. Hofer, M. E. Fermann, L. Goldberg. High-power side-pumped passively mode-locked Er-Yb fiber laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(9): 1247~1249

3 J. Y. Huang, H. C. Liang, K. W. Su *et al.*. High power passively Q-switched ytterbium fiber laser with Cr^{4+} :YAG as a saturable absorber[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(2): 473~479

4 Andreas E. H. Oehler, Thomas Sudmeyer, Kurt J. Weingarten. 100 GHz passively mode-locked Er:Yb:glass laser at 1.5 μm with 1.6-ps pulses[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(26): 21930~21935

5 Dong Shufu, Wang Yishan, Shen Hua *et al.*. High power single mode $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped double cladding fiber lasers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11): 1605~1609

董淑福,王屹山,沈华等. 高功率单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤激光器[J]. *光子学报*, 2005, **34**(11): 1605~1609

6 Zhang Shumin, Wang Jian, Dong Fajie *et al.*. Cladding pumped erbium-ytterbium co-doped double clad fiber laser operating in L-band[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 656~658

张书敏,王健,董法杰等. 包层抽运的 L 波段 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器[J]. *光子学报*, 2005, **34**(5): 656~658

7 Zhu Jianping, Li Yigang, Chen Shengping *et al.*. Ring cavity $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped double cladding fiber laser [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(7): 775~778

朱剑平,李乙钢,陈胜平等. 环形腔 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤激光器[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(7): 775~778

8 He Feng, Zhao Shanghong, Xia Ming. Effect of fiber parameters on the performance of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped double-cladding fiber lasers[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(4): 431~434

何风,赵尚弘,夏鸣. 光纤参数对双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器的影响[J]. *激光技术*, 2007, **31**(4): 431~434

9 Shumin Zhang, Fuyun Lu, Jian Wang. All-fiber actively Q-switched $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped ring laser [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2007, **49**(9): 2183~2186

10 Song Fang, Xu Wencheng, Chen Weicheng *et al.*. 78 fs passively mode-locked Er^{3+} -doped fiber ring laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1174~1177

宋方,徐文成,陈伟成等. 78 fs 被动锁模掺 Er^{3+} 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1174~1177

11 Wang Zhaoying. Fiber Ultra-Short Pulse Generation and All-Optical Wavelength Conversion[D]. Tianjin: Tianjin University, 2003. 23~27

王肇颖. 光纤超短脉冲光源和全光波长技术的研究[D]. 天津:天津大学, 2003. 23~27

12 Ammar Hideur, Thierry Chartier, Marc Brunel *et al.*. Mode-lock, Q-switch and CW operation of an Yb-doped double-clad fiber ring laser[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **198**(1-3): 141~146

13 Lan Xinju. Laser Technology[M]. Beijing: Science Press, 2007. 118~124

蓝信钜. 激光技术[M]. 北京:科学出版社, 2007. 118~124

14 Zhao Chunliu, Ma Ning, Yuan Shuzhong *et al.*. Rational harmonic mode-locked fiber ring laser using a LD modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(10): 1251~1253

赵春柳,马宁,袁树忠等. LD 调制有理数谐波锁模光纤激光器[J]. *光子学报*, 2001, **30**(10): 1251~1253

15 Ligu Luo, T. J. Tee, P. L. Chu. Chaotic behavior in erbium-doped fiber-ring lasers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**(3): 972~978