

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0056-05

非线性偏振旋转锁模光纤激光器的实验研究

任 芳¹ 向望华^{1,2} 白扬博¹ 李 楠¹ 师晓宙¹

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

摘要 对 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤环形腔激光器进行了实验研究。用性能稳定的 976 nm 激光二极管(LD)作为抽运源,利用非线性偏振旋转效应作为可饱和吸收体,通过调整偏振控制器的角度和改变抽运功率的大小,在实验中获得了连续基波锁模、调 Q 锁模、调 Q、高阶谐波锁模的激光输出。其中连续基波锁模重复频率 15.90 MHz,中心波长为 1.5583 nm,谱线宽度为 7.4 nm。调 Q 锁模的调 Q 重复频率为 147.06 kHz,锁模重复频率为 15.90 MHz,谱线宽度为 4.84 nm。被动调 Q 的重复频率为 147.06 kHz,谱线宽度为 1.8 nm。二阶谐波锁模重复频率为 31.80 MHz,三阶谐波锁模重复频率为 47.70 MHz。与单独的掺 Er^{3+} 光纤作为增益介质相比,本实验用 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤作为增益介质得到了更好的锁模输出效果。

关键词 激光器; 被动锁模; 非线性偏振旋转; 钪共掺光纤; 环形腔; 谐波锁模

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s1.0056

Experimental Study on the Nonlinear Polarization Rotation Mode-Locking Fiber Laser

Ren Fang¹ Xiang Wanghua^{1,2} Bai Yangbo¹ Li Nan¹ Shi Xiaozhou¹

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 A passively mode-locked fiber ring cavity laser with a small segment of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber as gain medium, pumped by stable 976 nm laser diode and mode-locked by the nonlinear polarization rotation technique, experimentally demonstrated. By adjusting the polarization controllers orientation and pump power, the stable operations of continual fundamental wave mode-locked with the repetition rate of 15.90 MHz and the spectral bandwidth of 7.4 nm, Q-switched-mode-locked with the spectral bandwidth of 4.84 nm, passive Q-switched with the repetition rate of 147.06 kHz and the spectral bandwidth of 1.8 nm, high-order harmonically mode-locked regimes in a ring cavity $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber laser have been obtained experimentally. Compared with Er^{3+} fiber as gain medium, the experiment accomplished by using $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber as gain medium shows a better output of mode-locking.

Key words lasers; passive mode-locking; nonlinear polarization rotation; $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber; ring cavity; harmonic mode-locking

1 引 言

激光技术的一个重要方向是向着输出脉冲宽度越来越窄,脉冲的峰值功率越来越高发展。而光纤激光器由于其结构简单、体积小、成本低、易与其他光纤设备兼容等受到国内外很多科研组的广泛关注。如工作波长在 1550 nm 的飞秒脉冲掺 Er^{3+} 光纤激光器

已经取得了很好的研究成果,其产生的稳定飞秒光脉冲在光纤通信、超快光学、医疗等诸多领域都有重要的应用^[1,2]。

Yb^{3+} 具有较大的峰值吸收截面(800~1100 nm),可以得到更高的增益,使 Er^{3+} 浓度保持在较低水平。在掺 Er^{3+} 光纤中共掺 Yb^{3+} 解决了由于 Er^{3+} 的高浓

基金项目: 天津市科委基金资助项目(013601011)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: whx@tju.edu.cn

度而带来的浓度淬灭效应,提高了抽运光的吸收效率^[3,4,15]。因此,Er³⁺/Yb³⁺共掺光纤有源器件引起了人们极大的兴趣,而在国内,对Er³⁺/Yb³⁺共掺全光纤激光器的实验研究方面的报道还较少。2005年,黄秀江等^[5]报道了掺Yb³⁺光纤环形腔激光器中重复频率为20 MHz的锁模脉冲输出。2006年,谢春霞等^[6]利用Er³⁺/Yb³⁺共掺光纤作为增益介质实现了脉冲周期为20 μs的自调Q脉冲和重复频率为7.937 MHz的自锁模脉冲输出。同年,林宏兔等^[7]用掺Yb光纤环形腔激光器实现了脉冲宽度为22.8 ps的4阶谐波锁模脉冲输出。2007年,Zhang等^[8]在掺Er光纤激光器中实现了最大重复频率为1.2 GHz的被动谐波锁模脉冲。本文报道了采用钇镱共掺光纤(EYDF)作为增益介质,利用非线性偏振旋转(NPR)效应作为可饱和吸收体的钇镱共掺光纤环形腔激光器的实验结果,不仅可以实现基波锁模,同时还观察到了二次、三次甚至更高阶的谐波锁模脉冲,介绍了实验结果并分析了其产生的原理。

2 实验原理及装置

非线性偏振旋转效应用于被动调Q中,也广泛用于被动锁模之中,其基本工作原理^[9,12,14]是经过偏振相关隔离器(PDI)的线偏振光经过第一个偏振控制器后变成椭圆偏振光,这个椭圆偏振光可以被认为是强度不等的左旋与右旋圆偏振光的合成。当这两个旋转方向不同的圆偏振光经过Er³⁺/Yb³⁺共掺光纤得到增益放大时,经历腔内光纤的非线性效应(Kerr效应)产生不同的非线性相移,由于非线性相移与强度有关,因而沿光脉冲不同位置处的偏振态不同。最后,两束圆偏振光在不同非线性相移的光脉冲的主偏振方向与偏振器方向一致,从而在偏振器上偏振处产生相干叠加(APM)效应,使得腔内产生自振幅调制可饱和吸收体效应,即锁模窄化效应。第二个光纤偏振控制器主要用于产生更强的APM效应,更有效地使光脉冲的前后沿越来越弱,光脉冲峰值越来越强,最后形成稳定的超短脉冲。这种脉冲形成过程就是利用光纤的非线性偏振旋转效应产生一个自振幅调制,从而形成等效可饱和吸收体的被动锁模机制。

在Er³⁺/Yb³⁺共掺光纤环形腔孤子激光器中,高阶谐波锁模光脉冲的产生机理是高阶光孤子的非稳定性和孤子间相互作用。下面利用光纤中的孤子理论来定性说明其产生过程^[10]。

光纤中的非线性薛定谔方程(NLSE)为

$$j \frac{dE}{dz} = -\frac{\beta_2 d^2 E}{dt^2} + \eta_p |E|^2 E, \quad (1)$$

其中E为光脉冲的电场包络,β₂为光纤的二阶群速度色散系数,η_p为描述光纤非线性的参数。上述NLSE方程在光纤的反常色散区(β₂ < 0)具有孤子解。对于一阶孤子解(N = 1)

$$E(t, z) = \sqrt{P_0} \operatorname{sech}(t/\tau) \exp(jk_s z), \quad (2)$$

$$P_0 = \frac{|\beta_2|}{\eta_p \tau^2}, \quad (3)$$

$$k_s = \frac{\pi}{4z_0} = \frac{|\beta_2|}{\eta_p \tau^2}, \quad (4)$$

$$z_0 = \frac{\pi}{2} \frac{|\beta_2|}{\tau^2}, \quad (5)$$

式中P₀为光纤中传输的一阶光孤子的峰值功率,z₀是光孤子周期,每当孤子在光纤中传输8z₀后积累的相移为2π,上述方程中的脉冲宽度τ和τ_{FWHM}的关系为τ_{FWHM} = 2ln(1 + √2)τ,对基孤子,其具有恒定的面积

$$A_s = \pi \tau \sqrt{P_0} = \pi \sqrt{\frac{|\beta_2|}{\eta_p}}, \quad (6)$$

A_s依赖于一定的光纤参数β₂和η_p。

一阶光孤子的能量E_p可以通过对整个光脉冲时域的积分求得

$$E_p = \int_{-\infty}^{\infty} |\sqrt{P_0}|^2 \operatorname{sech}^2\left(\frac{t}{\tau}\right) dt = 2P_0 \tau = \frac{2|\beta_2|}{\eta_p \tau}. \quad (7)$$

从(7)式可以看出,E_p与τ成反比,因此光孤子脉宽越窄,其具有的能量越大。而高阶孤子(N = 2, 3, …)比基孤子(N = 1)具有更大的面积,因此应该具有更大的单脉冲能量。但实际实验中并不会出现这种情况,由于腔内高阶光孤子的不稳定性,高阶孤子在腔内的形状会周期性地改变,或发生分裂产生低阶光孤子,而由于孤子边带光谱的产生,限制了其脉宽的进一步减小。从上述光孤子面积和光孤子能量表达式来看,对一个具体的光纤孤子激光器(腔内光纤具有特定的色散值和非线性值),光孤子脉冲的能量有一定的限制,因此当抽运激光功率增大时,腔内平均信号光功率增大,稳态时,光孤子的峰值功率最终达到由APM饱和所决定的最大值。由于光纤孤子激光器固有的光脉冲能量量子化作用,孤子激光器输出的单脉冲能量并不随抽运激光功率的增大而相应地增大,腔内形成多孤子振荡。而在整个腔体呈正色散(或零色散)的锁模光纤激光器中,随抽运激光功率的增大,输出光脉冲的能量也随之增大。

非线性偏振旋转 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器的实验装置如图 1 所示,其中偏振相关隔离器(PDI)可保证腔内运转光单方向运转又可起到起偏器的作用;两个偏振控制器(PC1 和 PC2)用来改变光的偏振状态;增益介质为 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤,长度为 1 m;用中心波长为 976 nm 的半导体激光器抽运,其最大抽运功率是 300 mW;用 976 nm/1550 nm 的波分复用器(WDM)把抽运光耦合到 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤中;输出耦合器的分束比是 10:90,其中 10%为输出端,在输出端加了一级放大,是为了更好地观察所出现的现象。整个激光器采用全光纤结构,腔的总长度约为 12.6 m。实验中,用连接有硅快速光电探测器监测输出光脉冲的时域特性,用多功能光谱分析仪监测输出脉冲的光谱特性,用微功率计测量激光的输出功率。

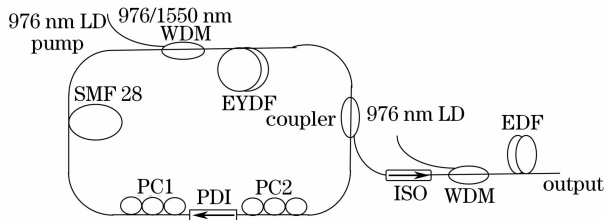


图 1 钇镱共掺光纤激光器的实验装置

Fig. 1 Experimental setup of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber ring cavity mode-locked laser

3 实验结果及分析

3.1 连续基波锁模脉冲

在实验中,让抽运光功率达到一定的值(超过激光阈值),然后调节偏振控制器的角度,可以观察到稳定的连续锁模脉冲序列输出。抽运功率的阈值为 9.5 mW,在不同的抽运功率下,一般都可以实现连续锁模。保证偏振控制器的位置不变,测量在未经一级放大的连续锁模状态下抽运功率与激光输出功率的大小关系,可知激光输出功率随着抽运功率的增大而增大(非线性),当抽运功率达到一定值时,输出功率值保持不变,光强达到饱和。图 2 是在抽运功率为 61 mW 时得到的连续锁模脉冲序列图和其相应的光谱图,其重复频率为 15.90 MHz,脉冲间隔为 62.88 ns,光谱宽度为 7.4 nm,中心波长为 1.5583 nm。考虑到输出脉冲为 sech^2 形,通过 $\Delta t \cdot \Delta \nu = 0.315$ 可以得到变换极限脉宽 344 fs,实际的脉宽要比这个稍微大些。图 3 是激光器输出功率与抽运功率的关系曲线,当抽运功率达到 131 mW

时,最大输出功率为 14.5 mW。

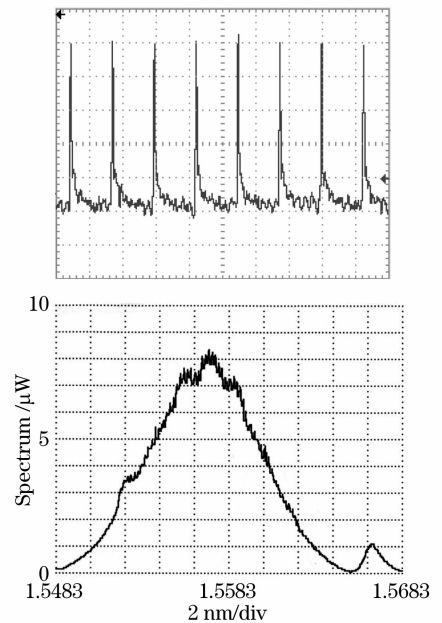


图 2 光纤激光器的锁模脉冲序列和光谱图。

(a) 脉冲序列; (b) 光谱

Fig. 2 Mode-locked pulse trains and output spectrum of fiber laser. (a) Pulse trains; (b) spectrum

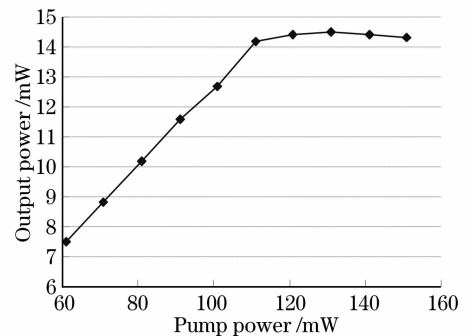


图 3 激光器输出功率与抽运功率的关系曲线

Fig. 3 Output power versus pump power of fiber laser

3.2 调 Q 锁模脉冲

当 PC 达到某一状态时, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器产生稳定的调 Q 锁模脉冲序列。图 4 是抽运功率为 70 mW 时的调 Q 锁模脉冲序列图及其光谱图。这种调 Q 锁模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 PC1 和 PC2 的状态使激光器产生锁模的,而同时当调整 PC1 和 PC2 时,等效于改变了腔内的增益与损耗,在增益和损耗达到某种状态时,使脉冲受到了调制,进而产生调 Q 锁模脉冲输出。

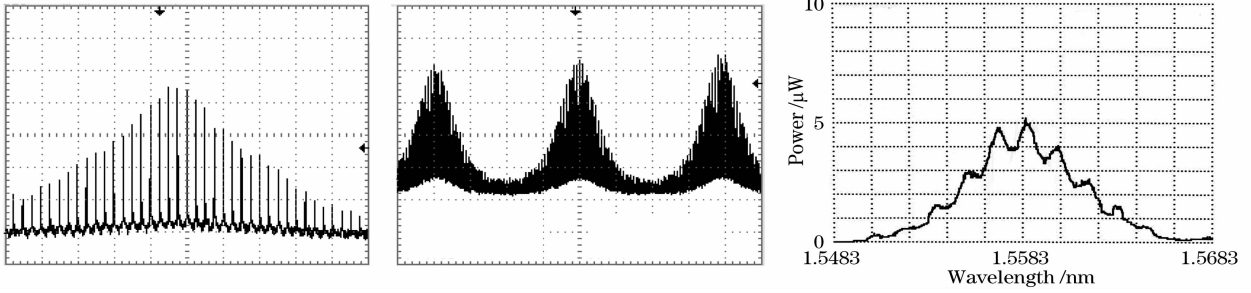


图4 光纤激光器调Q锁模脉冲序列及其输出光谱图

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

3.3 被动调Q脉冲

调整PC和改变抽运功率的大小,当达到某一状态时,激光器输出为稳定的被动调Q脉冲序列。图5是在抽运功率为32 mW时的调Q脉冲序列图及其光

谱图,重复频率为147.06 kHz,周期为6.8 μs,光谱宽度为1.8 nm。并且实验证实,在光纤激光器中不易出现被动调Q现象,并且在某一偏振控制状态下调Q的重复频率与抽运功率的大小有关。

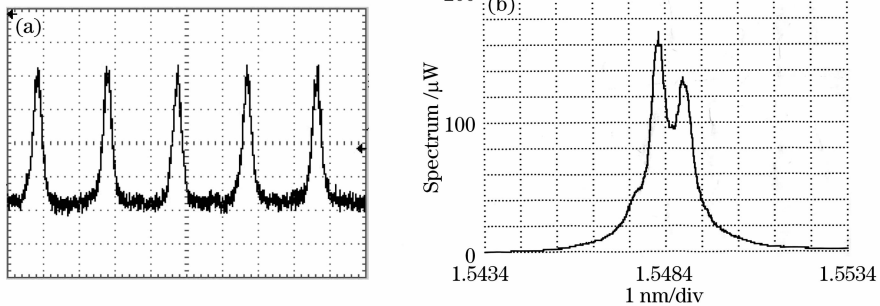


图5 抽运功率为70 mW时光纤锁模激光器输出调Q脉冲序列及其光谱图

Fig. 5 Q-switched pulse trains and output spectrum of fiber laser with the pump power of 70 mW

3.4 谐波锁模脉冲

在较低抽运功率下,光纤环形腔锁模激光器输出基频锁模脉冲,继续加大抽运功率,同时调整PC1和PC2的偏振状态,光纤环形腔激光器的输出光脉冲序列出现复杂的变化,并且在不同的偏振状态下,高阶锁模有不同的形式。在实验中,观察到脉冲的幅度值并不是继续增加的,而是减小,一个脉冲会突然分裂成两个脉冲,形成2阶谐波^[13]锁模脉冲序列,脉冲重复频率是基频锁模脉冲的2倍。当继续增加抽运功率时,有时会分裂成3阶谐波锁模脉冲序列,脉冲重

复频率是基频锁模脉冲的3倍。而且当抽运功率不太大时,也可以实现谐波锁模,当把PC1和PC2调整到适当的位置,抽运功率从零开始增大,当抽运功率为10.6 mW时,可以形成稳定的3阶谐波振荡,继续增加抽运功率,谐波脉冲的幅值会增大。综上所述,高阶谐波的产生与PC的状态及抽运功率的大小有关。本实验中得到2阶谐波锁模和3阶谐波锁模的脉冲序列图,如图6所示。除此之外,还观察到了幅值不等的混沌脉冲如图7,在光纤激光器中混沌脉冲的产生机制在其他地方已有报道^[11]。

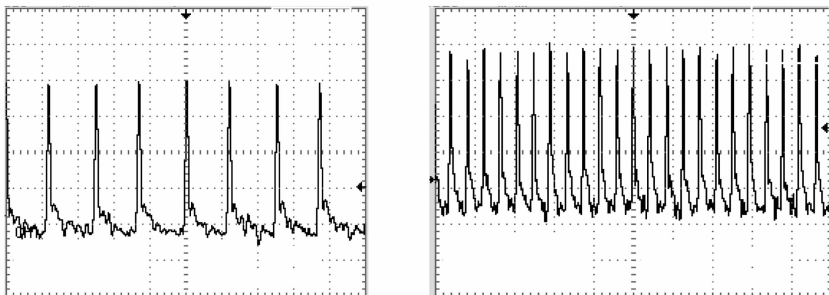


图6 不同谐波频率的脉冲序列。(a) 2阶谐波锁模;(b) 3阶谐波锁模

Fig. 6 Pulse trains of different harmonic frequency. (a) The 2nd harmonic; (b) the 3rd harmonic

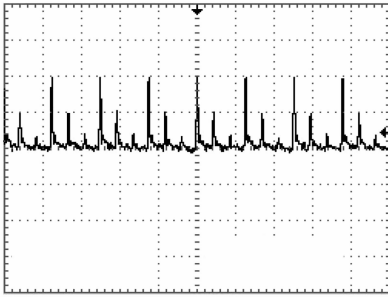


图 7 混沌脉冲序列

Fig. 7 Chaotic pulse trains

4 结 论

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,从 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺的环形腔全光纤激光器中得到了连续基波锁模、调 Q 锁模、调 Q、高阶谐波锁模的激光脉冲输出。通过实验发现,在连续锁模状态下,激光器的输出功率随抽运功率的增大而增大,当抽运功率到达一定值时,输出功率不再增大。同时还发现激光器输出状态的频率与抽运功率的大小有一定的关系。

参 考 文 献

- Gan Yu. Theoretical and experimental study on Yb^{3+} -doped ultra-short pulse laser[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. 31~32
甘雨. 掺镱光纤超短脉冲激光器的理论与实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2006. 31~32
- Wang Zhaoyin. 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
- Wang Tianshu, Guo Yubin, Li Jun *et al.*. All-fiber type cavity Er/Yb co-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10): 1161~1164
王天枢, 郭玉彬, 李军等. 全光纤型 Er/Yb 共掺光纤短腔激光器[J]. 中国激光, 2004, **31**(10): 1161~1164
- Xie Qiangqiang, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Output character of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped DFB fiber laser[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2008, **24**: 8~10
谢强强, 潘炜, 罗斌等. 共掺 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ DFB 光纤激光器的输出特性[J]. 科技创新导报, 2008, **24**: 8~10

- Huang Xiujiang, Sui Zhan, Liu Yongzhi *et al.*. Research on highly Yb^{3+} -doped passive mode-locked fiber ring laser [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, **45**(3): 269~270
黄秀江, 隋展, 刘勇志等. 高掺 Yb^{3+} 被动锁模光纤环形腔的研究[J]. 微波与光技术报, 2005, **45**(3): 269~270
- Xie Chunxia, Lü Fuyun, Zhang Shumin *et al.*. Self-Q-switched, self-mode-locked $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4): 485~488
谢春霞, 吕福云, 张书敏等. 自调 Q、自锁模掺 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器[J]. 光子学报, 2006, **35**(4): 485~488
- Lin Honghuan, Sui Zhan, Wang Jianjun *et al.*. Passive harmonically mode-locked Yb^{3+} -doped fiber laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(11): 1813~1817
林宏免, 隋展, 王建军等. 被动锁模掺 Yb^{3+} 光纤环形激光器[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(11): 1813~1817
- Z. X. Zhang, L. Zhan, X. X. Yang *et al.*. Passive harmonically mode-locked erbium-doped fiber laser with scalable repetition rate up to 1.2 GHz[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2007, **4**(8): 592~596
- 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
- G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics, Applications of Nonlinear Fiber Optics*[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.* transl., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 142~191
阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 谈斌等译, 北京: 电子工业出版社, 2002. 142~191
- L. G. 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
- Zhang Shumin, Lü Fuyun, Dong Fajie *et al.*. Nonlinear polarization rotation mode locked Yb^{3+} -doped fiber laser [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2004, **21**(5): 592~596
张书敏, 吕福云, 董法杰等. 非线性偏振旋转锁模 Yb^{3+} 光纤激光器的理论分析[J]. 量子电子学报, 2004, **21**(5): 592~596
- Song Jien, Guo Yong, Yang Guangqiang *et al.*. Second harmonic generation based on $\text{Er}-\text{Yb}$ co-doped fiber gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 72~74
宋继恩, 郭勇, 杨广强等. 掺 Er/Yb 共掺光纤二次谐波的产生[J]. 中国激光, 2005, **32**(1): 72~74
- M. Salhi, H. Leblond, F. Sanchez. Theoretical study of the erbium-doped fiber laser passively mode-locked by nonlinear polarization rotation[J]. *Phys. Rev. A*, 2003, **67**(1): 013802-1~013802-7
- Xie Chunxia, Lü Fuyun, Zhang Shumin *et al.*. High power Er/Yb co-doped fiber superfluorescent source[J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(1): 34~36
谢春霞, 吕福云, 张书敏等. 高功率 Er/Yb 共掺光纤超荧光光源[J]. 激光技术, 2006, **30**(1): 34~36