

高脉冲稳定性的 100 kHz 皮秒再生放大器

黄玉涛^{1,2,3} 樊仲维^{1,3*} 牛 岗³ 闫 莹^{1,3} 王小发^{1,2,3} 黄 科¹ 连富强^{1,2,3} 余 锦¹

¹中国科学院光电研究院, 北京 100094
²中国科学院研究生院, 北京 100049
³北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100192

摘要 报道了一种具有高脉冲稳定性的 100 kHz 皮秒脉冲再生放大装置。该放大装置采用激光二极管(LD)端面抽运的 Nd:YVO₄ 晶体作为增益介质, RTP 晶体作为电光晶体。再生腔的腔型为对称 W 型, 总长 1.8 m。分析了皮秒脉冲在再生放大腔中往返次数和再生腔损耗对放大脉冲倍周期分叉现象以及稳定放大时输出功率的影响。抽运功率为 30 W 时, 通过选取最优的往返次数获得了功率为 5.3 W 的高脉冲稳定性的再生输出, 脉冲稳定性均方根(RMS)值小于 2%。放大后皮秒脉冲脉宽为 13.78 ps, 脉冲峰值功率 3.84 MW, 再生腔输出的光束质量因子 $M^2 \leq 1.5$ 。

关键词 激光技术; 再生放大; 100 kHz; 皮秒脉冲; 倍周期分叉现象

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0502009

100 kHz Repetition Rate Picosecond Regenerative Amplifier with High Pulse Stability

Huang Yutao^{1,2,3} Fan Zhongwei^{1,3} Niu Gang³ Yan Ying^{1,3} Wang Xiaofa^{1,2,3}
Huang Ke^{1,2,3} Lian Fuqiang^{1,2,3} Yu Jin¹

¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³Beijing GK Laser Technology Co., Ltd, Beijing 100192, China

Abstract A laser diode-pumped picosecond Nd:YVO₄ regenerative amplifier system is reported, which produces high stable pulses at 100 kHz repetition rate. RTP crystal is chosen as electro-optical switches to control the output of regenerative amplifier. The amplifier is a symmetrical W type resonator with 1.8 m total length. The effects of round trips number and cavity losses on period doubling bifurcation and maximum output power are analyzed. When pump power is 30 W, the amplifier provides the output power of 5.3 W with pulse stability root mean square (RMS) is less than 2% by choosing the optimal round trips number. The amplified pulse has a pulse duration of 13.78 ps, a peak power of 3.84 MW. The beam quality factor M^2 after amplification is less than or equal to 1.5.

Key words laser technique; regenerative amplification; 100 kHz; picosecond pulse; period doubling bifurcation

OCIS codes 140.4050; 140.3280; 320.7120

1 引 言

近几年来以超短激光脉冲为代表的精细加工已经成为激光加工领域的热点, 引起了人们的广泛关注。理论分析和实验说明, 脉冲宽度为 10 ps 左右的激光脉冲能满足许多精细加工的要求^[1~3], 加工

效果可以同飞秒激光加工相媲美, 同时可避免飞秒激光在靶标前面的空气中发生的等离子体效应和由此引起的光束变形和散射。为了满足材料加工时所需的脉冲能量和加工速度, 皮秒激光器需采用高重复频率的再生放大技术。国外相继报道了对高重复

收稿日期: 2011-12-05; 收到修改稿日期: 2012-02-13

基金项目: 国家科技部国际合作(2010DFR50650)和中国科学院科研装备研制项目(Y2010008)资助课题。

作者简介: 黄玉涛(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事全固态皮秒激光器方面的研究。E-mail: yutaohuang@126.com

导师简介: 樊仲维(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事全固态皮秒激光器及大型复杂全固态激光器等方面的研究。E-mail: fanzw002@163.com(通信联系人)

频率皮秒再生放大技术的研究^[4~6],但国内的研究^[7~11]主要集中在皮秒锁模振荡器和低重复频率的皮秒再生放大技术上,对高重复频率皮秒再生放大技术的研究较少。

高重复频率再生放大器采用连续抽运,放大脉冲之间的抽运时间已远小于增益晶体的增益弛豫时间,抽运没有足够的时间来恢复稳定的增益,破坏了放大过程所消耗的反转粒子数和抽运阶段增加的反转粒子数之间的平衡性,致使相邻再生放大脉冲之间相互影响,出现放大脉冲的倍周期分叉现象。脉冲倍周期分叉会导致放大脉冲能量不稳定和重复周期加倍,影响精细加工的效果和速度,所以在高重复频率再生放大中应尽量避免倍周期分叉现象的出现。J. Dörring 等^[12]用速率方程理论解释并模拟了镱玻璃高重复频率再生放大过程中倍周期分叉现象,并分析了再生腔的参数对脉冲能量稳定性的影响。M. Grishin 等^[13,14]通过理论模拟和实验验证证实了种子的脉冲能量是影响倍周期分叉的重要因素,在振荡器后加入放大级增加种子的脉冲能量可以抑制高重复频率再生放大中的倍周期分叉,但这势必会增加系统的复杂性和成本。

本文分析了脉冲在再生腔内往返次数和再生腔损耗对倍周期分叉现象及稳定放大时最大输出功率的影响,在抽运功率为 30 W 时,选择合适的振荡次数,在对称 W 型再生腔中获得了平均功率为 5.3 W,重复频率为 100 kHz 的高稳定性皮秒脉冲。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,系统包括皮秒种子源和再生放大器两部分。皮秒种子源是采用半导体可饱和吸收镜(SESAM)被动锁模的 Nd:YVO₄ 皮秒振荡器,振荡器运转在连续锁模状态,获得了重复频率为 80 MHz、功率为 200 mW、脉宽 13 ps 的皮秒脉冲输出;产生的皮秒脉冲进入由偏振分光棱镜(PBS)、λ/2 波片、法拉第旋光器(FR)组成的光隔离系统(OI1),OI1 的作用是避免后续光路的光进入种子源,影响锁模的稳定性;f 为匹配透镜,用于皮秒种子源与再生放大腔的光束模式匹配,提高再生放大的提取效率;由偏振片(TFP1)、磁光隔离器(FR)、波片组成的光隔离系统(OI2)用于输出再生放大后的皮秒脉冲;再生放大腔为对称的 W 型腔,M1、M2、M4、M5 为镀有 1064 nm 高反膜的平凹镜,其中 M1 和 M2 的曲率半径为 2 m,M4 和 M5 的曲率半径为 900 mm。M3 为 0°的二向色性反射镜,抽运光入射面镀 808 nm 增透

膜,另一面镀 1064 nm 高反膜和 808 nm 增透膜。M6、M7、M8 为镀有 1064 nm 高反膜的 45°反射镜,λ/4 为四分之一波片,TFP2 为偏振片。再生腔总腔长 1.8 m,光在腔内往返一次的时间为 12 ns;再生腔增益介质采用大小为 4 mm×4 mm×10 mm 掺杂原子数分数为 0.3% 的 Nd:YVO₄ 晶体,晶体两面均镀 808 nm 和 1064 nm 增透膜。为减少晶体的热效应,晶体用铝箔包裹放在水冷的紫铜块里,晶体紧贴 M5 镜放置;抽运源采用北京国科世纪激光有限公司生产的 30 W 半导体激光器(LD),抽运光经聚焦耦合系统后,耦合到增益介质中;电光晶体采用 RTP 晶体,它由两块 4 mm×4 mm×10 mm 晶体组成,其底面与光学平台水平面成 45°放置,且两块晶体加电方向正交,此方法可以补偿晶体的自然双折射。晶体端面均镀 1064 nm 增透膜以减少插入损耗。采用北京国科世纪激光有限公司研发的电光驱动电源,重复频率为 100 kHz,脉冲宽度调节范围为 0~255 ns,其上升沿和下降沿时间均小于 4 ns。驱动电源的高压盒可提供 800~1000 V 的高压。

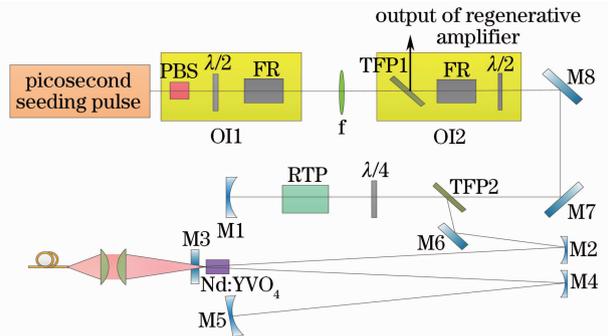


图 1 Nd:YVO₄ 再生放大系统

Fig. 1 Scheme of the Nd:YVO₄ regenerative amplifier

3 倍周期分叉现象

当皮秒脉冲在放大阶段中提取过多的能量后,就会导致在下一个抽运阶段中增益晶体的反转粒子数得不到恢复,下一个皮秒脉冲不能从再生腔中提取足够多的脉冲能量,产生倍周期分叉现象。图 2 为再生放大后的脉冲倍周期分叉现象。图 2(a)显示再生放大后脉冲裂化为两个幅值不同的脉冲;图 2(b)为放大后再生波形变为两个幅值不同的脉冲交替出现,脉冲的重复周期加倍。

倍周期分叉现象产生的原因在于脉冲在放大阶段提取了过多的能量。再生放大的放大阶段的物理过程可以用速率方程进行描述,Nd:YVO₄ 增益晶体为四能级系统,其反转粒子数密度 N 和光子数 ϕ 的

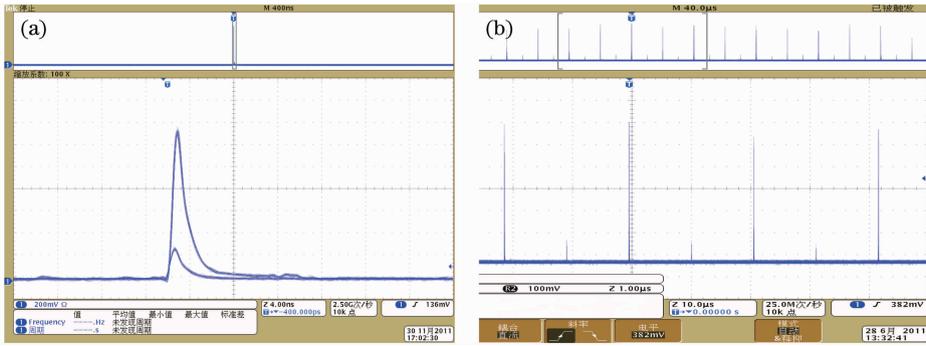


图 2 不稳定再生放大后的脉冲波形。(a)放大后脉冲能量的分裂现象;(b)再生放大后脉冲周期的加倍现象

Fig. 2 Screenshots of picosecond pulses after unstable regenerative amplification. (a) Single pulse after unstable regenerative amplification; (b) multi-pulses after unstable regenerative amplification

速率方程为

$$\frac{dN}{dt} = R_p - \frac{\sigma}{V}\phi N - \frac{N}{T_1}, \quad (1)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \left(\frac{\sigma L_a A_a}{V} N - \frac{1}{T_c} \right) \phi, \quad (2)$$

式中 R_p 为再生腔的抽运速率; c 为光速; σ 为增益介质的受激发射截面; V 为再生腔的模式体积; T_1 为增益介质的上能级寿命; L_a 为增益介质的长度; A_a 为增益介质中光束的横截面积; T_c 为再生腔内的光子寿命; t 为时间参数。由于放大阶段的持续时间很短,可以忽略放大阶段抽运和自发辐射对反转粒子数的影响,所以,(1)式可以简化为

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{\sigma}{V}\phi N, \quad (3)$$

在(2)式和(3)式各参数中,对于确定的再生放大腔结构和增益介质,再生腔的模式体积 V 、晶体中光束横截面积 A_a 和增益介质的受激发射截面 σ 、上能级寿命 T_1 、长度 L_a 是完全确定的。时间参数 t 和光子寿命 T_c 是影响放大阶段反转粒子数密度 N 和光子数 ϕ 的重要参数。所以,反应时间参数的种子往返次数和决定光子寿命的再生腔损耗会对再生放大的稳定性和脉冲能量的提取产生重要的影响。

在抽运功率为 30 W,再生腔固有损耗为 0.107 情况下,往返次数对再生放大后脉冲能量和功率的影响如图 3 所示。往返次数在 2~11 范围内,再生腔稳定放大,输出脉冲的能量单一稳定,再生腔增益大于损耗,脉冲能量和平均功率都呈上升趋势;在往返次数大于 11 后,脉冲能量开始分裂,出现倍周期分叉现象。由于脉冲重复频率为 100 kHz,不能通过能量计进行直接测量,利用工作在非饱和条件下光电探测器响应的脉冲幅值与脉冲能量呈线性关系,根据示波器上显示的脉冲高度来间接确定脉冲能量。随着往返次数的增加,高能量脉冲对低能量

脉冲的影响越来越大,两者的能量差值也越来越大,但总体来说腔内增益仍大于损耗,功率继续上升。直至往返次数为 15 时,功率到达最大值 6.06 W。能量较高的脉冲增益开始小于损耗,脉冲能量开始下降,低能量脉冲增益仍大于腔内损耗,能量开始上升,再生腔输出功率开始下降。所以,往返次数为 11 是最优值,此时放大后的脉冲能量单一稳定且最大,再生腔输出单脉冲能量为 53 μ J,功率为 5.3 W。

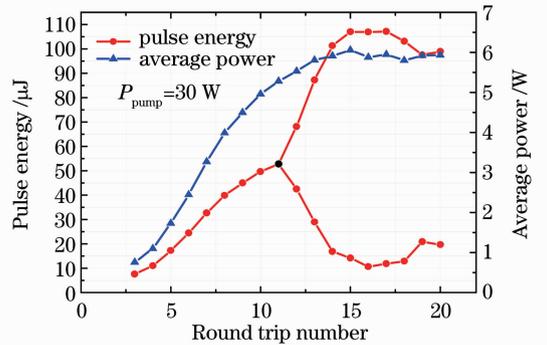


图 3 脉冲能量和功率随往返次数的变化曲线

Fig. 3 Pulse energy and average power versus number of cavity round trips

在再生腔腔镜 M5 前插入一个 $\lambda/4$ 波片, $\lambda/4$ 波片和偏振片 TFP2 组成一个可调输出镜,通过旋转波片角度可以增大再生腔的损耗。不同损耗下,再生腔稳定放大时的最优往返次数和最大输出功率的表 1 不同损耗下再生腔稳定放大时的最优往返次数和最大输出功率的变化情况

Table 1 Maximum power and optimal round trip number after stable regenerative amplification for different cavity losses

Cavity loss	Number of cavity round trip	Maximum power /W
0.107	11	5.3
0.128	11	5.1
0.174	11	4.5

变化情况如表 1 所示。增大再生腔的损耗没有影响最优的往返次数,但减少了再生腔稳定放大时输出的最大功率。所以,为了提升稳定再生放大时的输出功率,应减少再生腔的损耗。

4 实验结果及分析

在 30 W 抽运下,再生腔固有损耗为 0.107,脉

冲往返次数为 11 次时,再生腔稳定放大时的最大单脉冲能量为 53 μJ ,此时,再生腔稳定放大后的脉冲波形如图 4 所示。图 4(a)为单个再生放大脉冲的波形图,再生放大后主从脉冲比可达 200:1,脉冲的稳定性均方根(RMS)值小于 2%;图 4(b)为再生放大后多个脉冲的波形图,可看出再生放大后的脉冲非常稳定,无漏脉冲和脉冲幅值分裂现象。

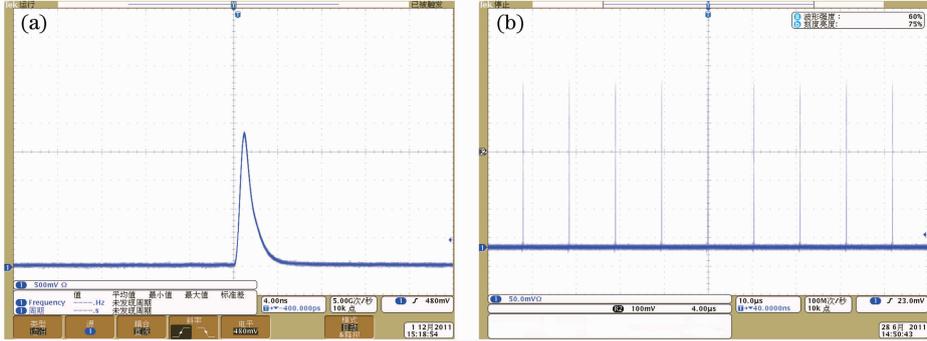


图 4 再生腔稳定放大时输出脉冲的波形图。(a)单个再生放大后脉冲的波形图;(b)再生放大后多个脉冲的波形图
Fig. 4 Screenshots of picosecond pulses after stable regenerative amplification. (a) Single stable pulse after regenerative amplification; (b) multiple pulses after regenerative amplification

图 5 为放大前后皮秒脉冲的时间特性和光谱特性。图 5(a)为再生放大前皮秒脉冲的自相关曲线,

自相关曲线为高斯型,脉冲宽度为 13 ps;图 5(b)为再生放大后脉冲的自相关曲线,自相关曲线为高斯

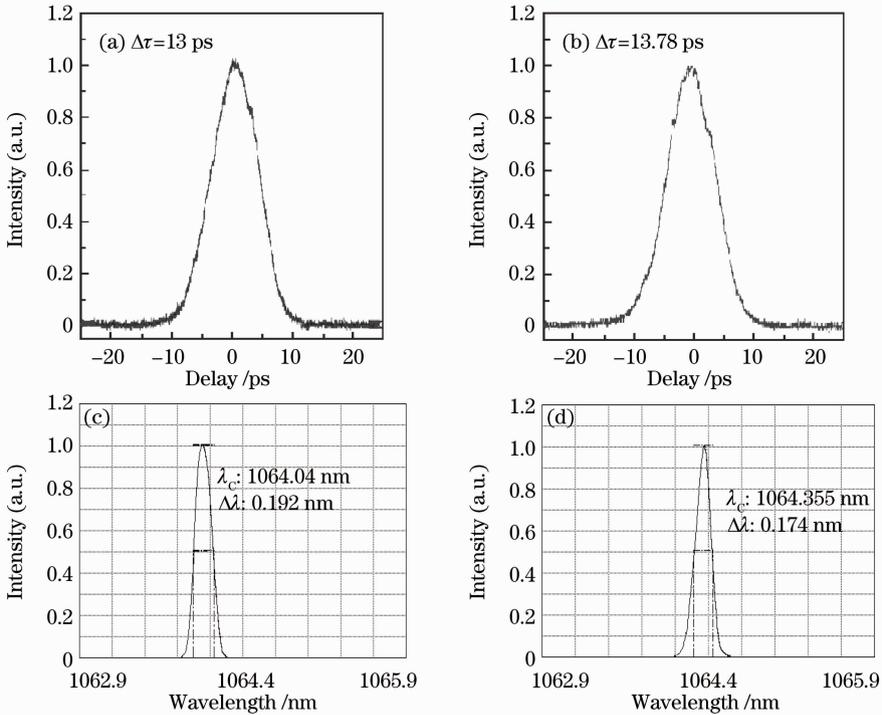


图 5 放大前后皮秒脉冲的时间特性和光谱特性。(a)放大前脉冲的自相关曲线;(b)放大后脉冲的自相关曲线;
(c)放大前脉冲的光谱特性;(d)放大后脉冲的光谱特性

Fig. 5 Intensity autocorrelation trace and optical spectra of the injected and amplified laser pulses. (a) Intensity autocorrelation trace of the injected pulses; (b) intensity autocorrelation trace of the amplified pulses; (c) optical spectrum of the injected pulses; (d) optical spectrum of the amplified pulses

型,说明放大后脉冲中无直流成分和调 Q 脉冲出现,测得脉冲宽度为 13.78 ps,脉冲的峰值功率为 3.84 MW;图 5(c)为放大前皮秒脉冲的光谱特性,中心波长 1064.04 nm,光谱宽度为 0.192 nm。由于再生放大过程中的频率迁移,放大后脉冲的中心波长漂移到 1064.355 nm,光谱宽度为 0.174 nm,如图 5(d)所示。

再生后的激光近基模输出,经测量光束质量因子 $M^2 \leq 1.5$,其远场的光斑模式如图 6 所示。

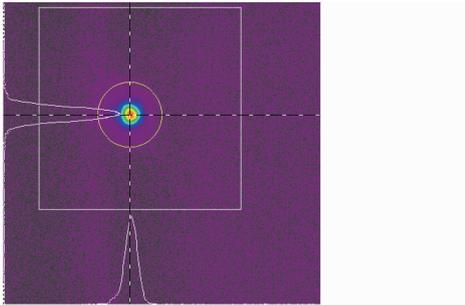


图 6 再生放大后激光的光斑模式

Fig.6 Spatial profile after stable regenerative amplification

5 结 论

介绍了一种采用 LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体的高重复频率皮秒脉冲再生放大装置,再生腔用 RTP 晶体作为电光晶体进行皮秒脉冲选单。通过选择合适的往返次数,获得了 5.3 W 稳定的再生放大脉冲,再生后稳定的皮秒脉冲脉宽为 13.78 ps,峰值功率为 3.84 MW,重复频率为 100 kHz 的,脉冲能量稳定性均方根值小于 2%,再生腔空间光束质量小于等于 1.5。该再生放大系统已应用到实际激光产品中,系统的稳定性可靠性完全满足产品化要求。

参 考 文 献

1 M. Kraus, S. Collmer, S. Sommer *et al.*. Microdrilling in steel with frequency-doubled ultrashort pulsed laser radiation[J]. *J. Laser Micro/Nanoengineering*, 2008, **3**(3): 129~134

2 H. K. Tönshoff, F. von Alvensleben, A. Ostendorf *et al.*. Micromachining of metals using ultrashort laser pulses[J]. *J. Laser Applications*, 2000, **12**(1): 23~27

3 H. K. Tönshoff, A. Ostendorf, C. Kulik *et al.*. Finishing of cutting tools using selective material ablation[C]. Copenhagen: Proceedings of 1st International CIRP Seminar on Micro and Nano Technology, 2003

4 J. Kleinbauer, R. Knappe, R. Wallenstein. 13-W picosecond Nd:GdVO₄ regenerative amplifier with 200-kHz repetition rate [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(2-3): 163~166

5 M. Siebold, M. Hornung, J. Hein *et al.*. A high-average-power diode-pumped Nd:YVO₄ regenerative laser amplifier for picosecond-pulses[J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **78**(3-4): 287~290

6 J. Kleinbauer, R. Knappe, R. Wallenstein *et al.*. A powerful diode-pumped laser source for micro-machining with ps pulses in the infrared, the visible and the ultraviolet[J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **80**(3): 315~320

7 Fu Jie, Pang Qingsheng, Chang Liang *et al.*. Research on cavity-dumping mode-locked laser of picosecond at 10 kHz[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0314002

付洁, 庞庆生, 常亮等. 10 kHz 腔倒空锁模皮秒激光器研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0314002

8 Wang Jiangfeng, Zhu Haidong, Li Xuechun *et al.*. Highly stable laser diode-pumped Nd:YLF regenerative amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 187~190

王江峰, 朱海东, 李学春等. 高稳定激光二极管抽运 Nd:YLF 再生放大器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 187~190

9 Chang Liang, Chen Meng, Li Gang *et al.*. Thermal characteristic analysis of laser diode side-pumped regenerative amplifier for kHz picosecond laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 873~876

常亮, 陈檬, 李港等. 激光二极管侧面抽运千赫兹皮秒激光再生放大器的热特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 873~876

10 Yan Ying, Fan Zhongwei, Niu Gang *et al.*. Laser diode end-pumped kilohertz Nd:YVO₄ picosecond regenerative amplifier [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(2): 021402

闫莹, 樊仲维, 牛岗等. 激光二极管千赫兹级 Nd:YVO₄ 皮秒脉冲激光再生放大器[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(2): 021402

11 Ma Yunfeng, Fan Zhongwei, Niu Gang *et al.*. 2.5 W picosecond pulse regenerative amplifier with 100 kHz repetition rate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2825~2828

麻云凤, 樊仲维, 牛岗等. 重复频率 100 kHz, 平均功率 2.5 W 的皮秒脉冲再生放大器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2825~2828

12 J. Dörring, A. Killi, U. Morgner *et al.*. Period doubling and deterministic chaos in continuously pumped regenerative amplifiers[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(8): 1759~1768

13 M. Grishin, V. Gulbinas, A. Michailovas. Bifurcation suppression for stability improvement in Nd:YVO₄ regenerative amplifier[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(18): 15700~15708

14 M. Grishin, V. Gulbinas, A. Michailovas. Dynamics of high repetition rate regenerative amplifiers[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(15): 9434~9443