

# 百千赫兹皮秒再生放大器的输出特性

赵鹏, 陈檬\*, 禹伶俐, 龙明亮

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

**摘要** 高重复频率再生放大器的能量提取周期远小于激光增益介质上能级寿命, 这会导致再生放大器输出一高一低两种能量的激光脉冲, 即倍周期分叉现象。针对上述问题, 从理论上分析高重复频率 Nd:YVO<sub>4</sub> 再生放大器的输出脉冲稳定性与重复频率之间的关系, 发现提高再生放大器重复频率可以避免出现倍周期分叉现象, 并通过实验验证了当重复频率大于 250 kHz 时, Nd:YVO<sub>4</sub> 再生放大器没有出现倍周期分叉现象。此外, 在吸收抽运功率为 70 W 时, 实现了对单脉冲能量为 1 nJ、重复频率为 94 MHz 的全固态 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体半导体可饱和吸收镜锁模种子激光脉冲的再生放大, 得到重复频率可调 (250~500 kHz) 的皮秒激光, 其最大输出功率达到 18 W, 单脉冲能量为 36 μJ。

**关键词** 激光技术; 全固态激光器; 再生放大技术; Nd:YVO<sub>4</sub>; 高重复频率

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.061403

## Output Characteristics of Few Hundreds kHz Picosecond Regenerative Amplifiers

Zhao Peng, Chen Meng, Yu Lingjie, Long Mingliang

*Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

**Abstract** Considering that the energy extraction period becomes much smaller than the energy upper state lifetime of the laser gain media, the output laser of high repetition rate regenerative amplifiers contains two-different-energy pulses, which is generally described as the period doubling bifurcation phenomenon. In order to solve this problem, we study the relation between the output laser pulse stabilization of high repetition rate regenerative amplifiers and repetition rate theoretically, and find that the period doubling bifurcation phenomenon can be avoided by increasing the repetition rate of regenerative amplifiers. The experimental results show the period doubling bifurcation phenomenon is avoided when the repetition rate is more than 250 kHz. Furthermore, the regenerative amplification of 1 nJ pulse energy is produced by all-solid-state Nd:YVO<sub>4</sub> crystal semiconductor saturable absorber mirror mode-locked picosecond laser with the repetition rate of 94 MHz. And when the absorbed pump laser is 70 W, we get the frequency tunable (250-500 kHz) picosecond laser. The maximum output average power is 18 W, and the single pulse energy is 36 μJ.

**Key words** laser technique; all-solid-state laser; regenerative amplifier; Nd:YVO<sub>4</sub>; high repetition rate

**OCIS codes** 140.0140; 140.3280; 140.3480; 140.7090

## 1 引言

再生放大普遍应用于超短激光脉冲放大器, 这项技术能够提高几个数量级的增益并且能够消除放大自发辐射的问题<sup>[1]</sup>。起初, 再生放大器的重复频率需求只有几千赫兹<sup>[2]</sup>, 随着激光微加工领域的不断发展, 固体激光器的重复频率需求越来越大<sup>[3-6]</sup>。但当再生放大器的重复频率大于百千赫兹时, 能量提取周期远远小于激光增益介质上能级寿命, 这将导致在放大时出现一高一低两种能量的激光脉冲输出, 而非单一能量的稳定激光脉冲输出, 这是由百千赫兹再生放大复杂的增益恢复和能量提取的动态过程造成的, 这种现象被称为倍周期现象<sup>[7-12]</sup>。

收稿日期: 2016-12-25; 收到修改稿日期: 2017-01-25

基金项目: 国家自然科学基金(U1631240)、北京市基金重点 B 类项目(KZ201510005001)

作者简介: 赵鹏(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: ziponer@163.com

导师简介: 陈檬(1963—), 女, 研究员, 硕士生导师, 主要从事全固态纳秒、皮秒、倍频激光器件等方面的研究。

E-mail: chenmeng@bjut.edu.cn(通信联系人)

对 Nd:YVO<sub>4</sub>再生放大器动态过程进行模拟<sup>[13]</sup>,发现再生放大器的工作频率大于 200 kHz 时,再生放大器可以获得最大增益条件下单一能量的稳定输出。本文研究了 100~500 kHz 的 Nd:YVO<sub>4</sub>再生放大器在 1 nJ 种子注入下的输出稳定特性。实验结果表明:重复频率在 100~200 kHz 之间,再生放大器在最大输出功率下出现了明显的脉冲倍周期现象;当重复频率大于 200 kHz 时,再生放大器的输出脉冲稳定性有明显改善,特别是当重复频率大于等于 250 kHz 时,输出的激光脉冲均为单一能量值的稳定输出。实验结果进一步验证了文献[13]的模拟结果,并获得最大平均功率为 18 W、重复频率为 250~500 kHz 之间单一能量的再生放大器的稳定输出。

## 2 实验装置

图 1 为再生放大器实验光路示意图。种子光为半导体抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>半导体可饱和吸收镜锁模激光器,单脉冲能量为 1 nJ,重复频率为 94 MHz,脉冲宽度为 9 ps。锁模种子激光经过法拉第光隔离器系统(TFP3+HWP+FR)后,经过偏振片 TFP1 入射再生放大腔,往返经过 1/4 波片(QWP)和 BBO 普克尔盒(BBO-PC),偏振态旋转 90°后被 TFP1 反射到再生放大腔的其余光学元件上。再生放大器的激光工作物质是掺杂原子数分数为 0.5%,长度为 30 mm,通光面尺寸为 4 mm×4 mm,切割方向为 a-cut 的 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体。抽运源是抽运波长为 888 nm 的光纤耦合半导体激光器,光纤芯径为 400 μm,从光纤出射的抽运光经 2.5 倍准直聚焦镜会聚到激光晶体内,晶体内抽运光斑的直径为 1000 μm。腔镜 M3 和 M4 为等厚弯月镜,表面镀 1064 nm 高反( $R > 99.8\%$ ),880~915 nm 增透膜( $T_{888\text{ nm}} > 99.0\%$ ),作用是补偿高抽运功率下的热透镜效应。M1、M2、M5、M6 均为 1064 nm 凹面全反镜。谐振腔的总腔长为 1.8 m,对应激光在谐振腔内往返一次的时间为 12 ns。功率计 PM2 用来探测激光晶体吸收抽运光的情况,功率计 PM1 用来探测再生放大器输出的激光功率。光电探测器 PIN1 用来探测再生放大器输出的脉冲波形,光电探测器 PIN2 用来探测再生放大器内种子光脉冲被放大的过程,即再生放大成长过程,普克尔盒驱动源 PC-driver 的最大工作频率为 500 kHz。

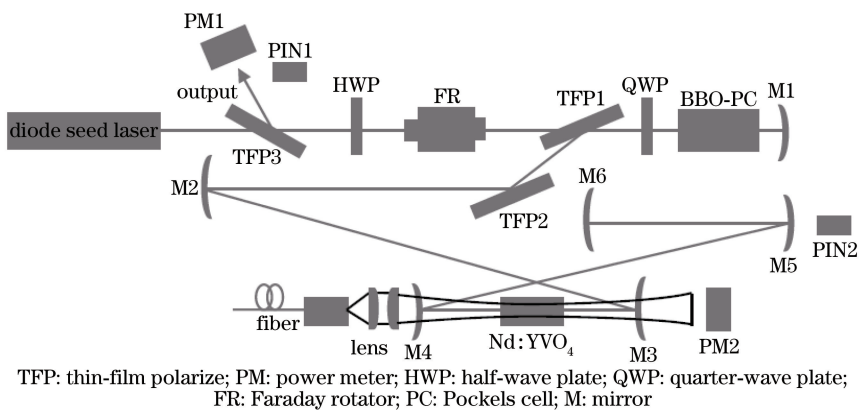


图 1 888 nm 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>高重复频率皮秒激光再生放大光路图

Fig. 1 Optical layout of 888 nm end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> high repetition rate picosecond laser regenerative amplifier

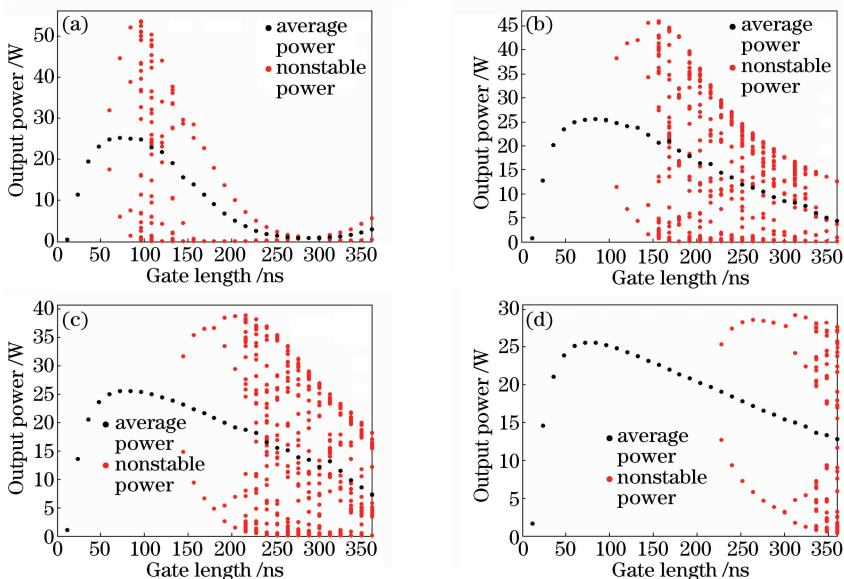
## 3 结果与讨论

### 3.1 高重复频率 Nd:YVO<sub>4</sub>皮秒激光再生放大器稳定性数值模拟结果<sup>[13]</sup>

根据文献[14]的连续抽运再生放大器动态过程解析式,对 Nd:YVO<sub>4</sub>再生放大器进行数值模拟,表 1 为模拟再生放大动态过程所用的参数表,图 2 为不同重复频率下再生放大器输出功率与普克尔盒加压时间的关系,其中黑色实心圆点代表再生放大器输出的激光平均功率,红色实心圆点代表输出光脉冲出现不稳定性(不是单一能量输出)。从图 2 可以看出,在重复频率为 100 kHz 时,再生放大器在输出功率达到最高值之前,出现了红色实心圆点,表明输出光脉冲具有不稳定性;当重复频率大于 200 kHz 时,再生放大器可以获得最大增益条件下单一能量的稳定输出。因此,通过改变重复频率,高重复频率 Nd:YVO<sub>4</sub>再生放大器既可以满足最大输出功率,又可以保证输出能量的稳定性。

表 1 Nd:YVO<sub>4</sub>再生放大器计算参数Table 1 Simulated parameters of the Nd:YVO<sub>4</sub> regenerative amplifier

Variation	Small signal gain coefficient $g_0 / \text{cm}^{-1}$	Round trip time $t_R / \text{ns}$	Losses per round trip $l / \%$	Seed energy $E_{\text{seed}} / \text{nJ}$	Mode radius in amplifier crystal $r_k / \mu\text{m}$	Crystal length $L / \text{mm}$	Emission cross section $\sigma_L / 10^{-19} \text{cm}^2$	Saturation energy $E_{\text{sat}} / \text{mJ}$	Upper state lifetime $\tau_L / \mu\text{s}$
Value	0.71	12.6	15	1	500	30	15.6	0.47	100

图 2 在不同重复频率下, Nd:YVO<sub>4</sub>再生放大器输出稳定性随加压脉冲宽度的变化。(a)  $f_{\text{PRF}} = 100 \text{ kHz}$ ;(b)  $f_{\text{PRF}} = 200 \text{ kHz}$ ; (c)  $f_{\text{PRF}} = 300 \text{ kHz}$ ; (d)  $f_{\text{PRF}} = 500 \text{ kHz}$ Fig. 2 Stability of Nd:YVO<sub>4</sub> regenerative amplifier versus gate length at different repetition rates.(a)  $f_{\text{PRF}} = 100 \text{ kHz}$ ; (b)  $f_{\text{PRF}} = 200 \text{ kHz}$ ; (c)  $f_{\text{PRF}} = 300 \text{ kHz}$ ; (d)  $f_{\text{PRF}} = 500 \text{ kHz}$ 

### 3.2 实验验证结果

图 3 为 PIN1 探测到的 100 kHz 再生放大器在加压时间为 154 ns(对应输出的平均功率最大,即最高增益条件下)时的输出光脉冲序列。采用数字荧光示波器(DSO7054B 70604C 型, Agilent Technologies, 美国), 带宽为 500 MHz, 采样率为 25 GS/s。图 3 表明再生放大器输出的光脉冲存在一高一低两个能量值, 即再生放大器存在倍周期现象。

保持其他实验条件不变下, 进一步增加 Nd:YVO<sub>4</sub>再生放大器的重复频率, 发现当  $f_{\text{PRF}} \leq 200 \text{ kHz}$  时, 再生放大器的输出存在一高一低两个能量值的波形[图 4(a)、(b)]; 当  $f_{\text{PRF}} \geq 250 \text{ kHz}$  时, 再生放大输出稳定的单一能量脉冲[图 4(c)~(f)]。这是因为在重复频率不小于 250 kHz 时, 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恢复了平衡, 相邻的再生放大输出脉冲不再相互影响。因此, 可以通过选择重复频率实现百 kHz 高重复频率 Nd:YVO<sub>4</sub>再生放大器输出的稳定性。

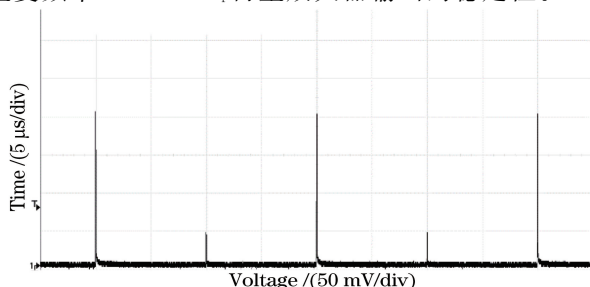


图 3 重复频率为 100 kHz 的再生放大器的输出激光脉冲序列波形

Fig. 3 Output pulse train waveform of regenerative amplifier when repetition rate is 100 kHz

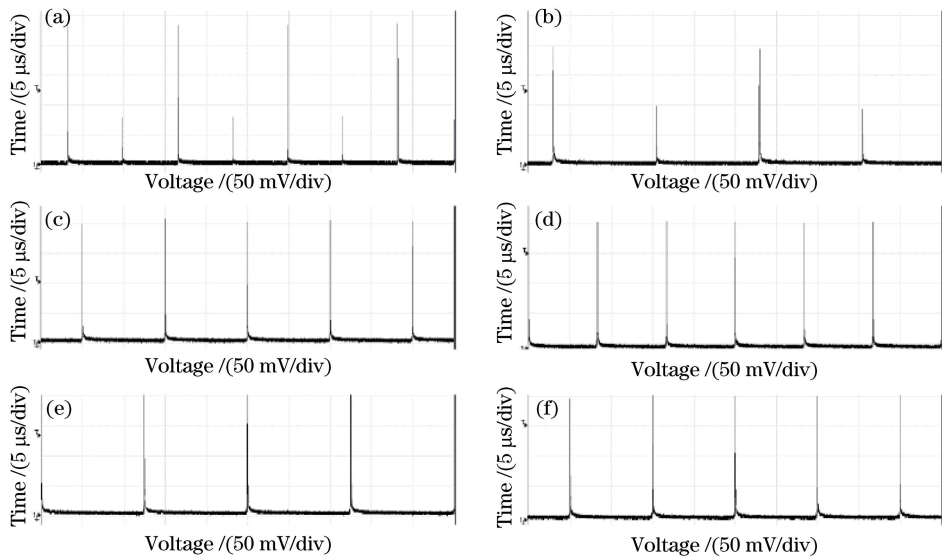


图 4 不同重复频率下再生放大输出激光脉冲序列稳定性波形。(a)  $f_{\text{PRF}} = 150 \text{ kHz}$ ; (b)  $f_{\text{PRF}} = 200 \text{ kHz}$ ; (c)  $f_{\text{PRF}} = 250 \text{ kHz}$ ;  
(d)  $f_{\text{PRF}} = 300 \text{ kHz}$ ; (e)  $f_{\text{PRF}} = 400 \text{ kHz}$ ; (f)  $f_{\text{PRF}} = 500 \text{ kHz}$

Fig. 4 Output pulse train waveform of regenerative amplifier at different repetition rates. (a)  $f_{\text{PRF}} = 150 \text{ kHz}$ ;  
(b)  $f_{\text{PRF}} = 200 \text{ kHz}$ ; (c)  $f_{\text{PRF}} = 250 \text{ kHz}$ ; (d)  $f_{\text{PRF}} = 300 \text{ kHz}$ ; (e)  $f_{\text{PRF}} = 400 \text{ kHz}$ ; (f)  $f_{\text{PRF}} = 500 \text{ kHz}$

图 5 为在吸收抽运功率为 70 W 时,不同重复频率下获得的最大输出功率。从图 5 可以看出,在 250~500 kHz 重复频率下输出功率变化微小。500 kHz 时 Nd:YVO<sub>4</sub>皮秒再生放大器的输出脉宽为 12.631 ps,光束质量  $M^2$  为 1.73(图 6)。

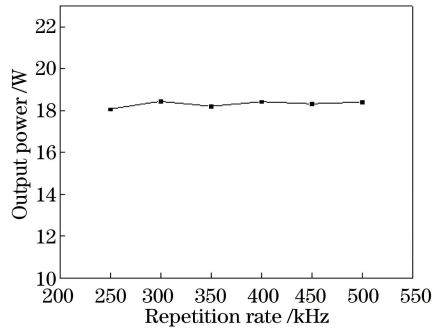


图 5 不同重复频率下稳定的最大输出功率

Fig. 5 Stable maximum output power at different repetition rates

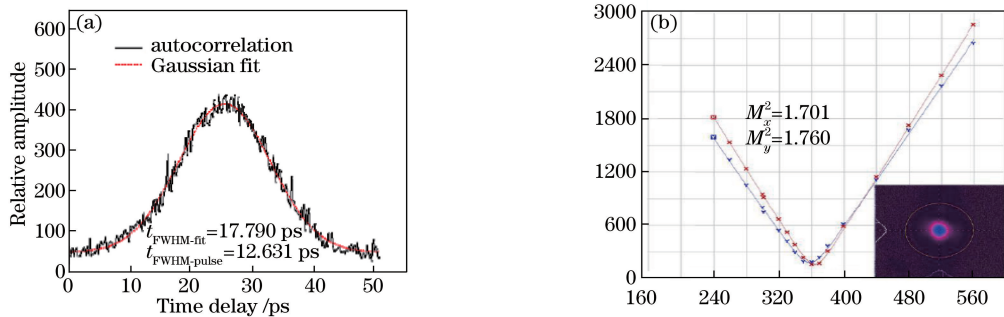


图 6 重复频率为 500 kHz 时, (a) Nd:YVO<sub>4</sub>再生放大光脉冲自相关曲线; (b) 激光光斑轮廓及  $M^2$  因子  
Fig. 6 (a) Autocorrelation trace of light pulse; (b) beam profile and  $M^2$  parameter under Nd:YVO<sub>4</sub>  
regenerative amplifier when the repetition rate is 500 kHz

## 4 结 论

百 kHz 再生放大器在不改变注入种子能量和抽运条件下,通过选择适当的重复频率范围,即可有效地避免因增益恢复和能量提取的复杂动态过程造成输出脉冲能量呈现倍周期的现象,实现了重复频率为 250~500 kHz,抽运波长为 888 nm 的端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 皮秒再生放大器在最大增益条件下单一能量的稳定输出。再生放大器的最大输出功率为 18 W,光-光转换效率为 26%,脉冲宽度为 12.631 ps,光束质量  $M^2$  为 1.73。

## 参 考 文 献

- [1] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. Sun wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang, Transl. 5th ed. Beijing: Science Press, 2002: 489-496.  
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 5版. 北京: 科学出版社, 2002: 489-496.
- [2] Forget S, Balembois F, Georges P, *et al.* A new 3D multipass amplifier based on Nd:YAG or Nd:YVO<sub>4</sub> crystals[J]. Applied Physics B, 2002, 75(4-5): 481-485.
- [3] Kolev V Z, Lederer M J, Luther-Davies B, *et al.* Passive mode locking of a Nd:YVO<sub>4</sub> laser with an extra-long optical resonator[J]. Optics Letters, 2003, 28(14): 1275-1277.
- [4] Nickel D, Stolzenburg C, Beyertt A, *et al.* 200 kHz electro-optic switch for ultrafast laser systems[J]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(3): 033111.
- [5] Hong Juan, Xuan Rongwei, Huang Haibing, *et al.* B-doped nano-Si-paste by picosecond laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(10): 1002001.  
洪 娟, 宣容卫, 黄海冰, 等. 皮秒激光熔覆硼掺杂硅纳米浆料的实验研究[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1002001.
- [6] Raciukaitis G, Grishin M, Danielius R, *et al.* High repetition rate ps-and fs-DPSS lasers for micromachining[C]. ICALEO 2006 Proceedings on CD-ROM, (Laser Institute of America), 2006: 99.
- [7] Clubley D A, Bell A S, Friel G. High average power Nd:YVO<sub>4</sub> based pico-second regenerative amplifier[C]. Lasers and Applications in Science and Engineering, International Society for Optics and Photonics, 2008: 68711D.
- [8] Lührmann M, Harth F, Theobald C, *et al.* High average power Nd:YVO<sub>4</sub> regenerative amplifier seeded by a gain switched diode laser[C]. SPIE, 2011: 7912: 791210.
- [9] Huang Yutao, Fan Zhongwei, Niu Gang, *et al.* 100 kHz repetition rate picosecond regenerative amplifier with high pulsestability[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502009.  
黄玉涛, 樊仲维, 牛 岗, 等. 高脉冲稳定性的 100 kHz 皮秒再生放大器[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502009.
- [10] Chen Meng, Chang Liang, Yang Chao, *et al.* 100 kHz Nd:YVO<sub>4</sub> picosecond regeneration amplifier end-pumped by 914 nm laser diode[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602010.  
陈 檬, 常 亮, 杨 超, 等. 914 nm LD 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 100 kHz 皮秒再生放大器[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602010.
- [11] Grishin M, Gulbinas V, Michailovas A. Bifurcation suppression for stability improvement in Nd:YVO<sub>4</sub> regenerative amplifier[J]. Optics Express, 2009, 17(18): 15700-15708.
- [12] Grishin M, Gulbinas V, Michailovas A. Dynamics of high repetition rate regenerative amplifiers[J]. Optics Express, 2007, 15(15): 9434-9443.
- [13] Chang Liang. Research on diode laser pumped high repetition rate picosecond laser regenerative amplifier[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012: 67-80.  
常 亮. 半导体泵浦高重复频率皮秒激光再生放大器的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012: 67-80.
- [14] Dörring J, Killi A, Morgner U, *et al.* Period doubling and deterministic chaos in continuously pumped regenerative amplifiers[J]. Optics Express, 2004, 12(8): 1759-1768.