

# 914 nm LD 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 100 kHz 皮秒再生放大器

陈 檬 常 亮 杨 超 陈立元 李 港

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 采用 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体带内抽运波长 914 nm, 降低激光二极管(LD)连续抽运时晶体的热负荷和端面热应力, 提高高重复频率 Nd:YVO<sub>4</sub> 皮秒再生放大器输出性能。研究分析了普克尔盒加压脉宽对工作频率为 100 kHz 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 再生放大器输出脉冲稳定性的影响, 在吸收 914 nm 抽运功率为 68 W, 通过控制普克尔盒加压脉宽, 实现了对单脉冲能量为 1 nJ、脉宽为 5.7 ps、频率为 42.7 MHz 的全固态 Nd:YVO<sub>4</sub> 半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模种子激光脉冲的稳定的 100 kHz 皮秒激光再生放大, 输出平均功率为 21.2 W。

**关键词** 激光技术; 全固态激光器; 再生放大技术; 皮秒脉冲; Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体; 914 nm 波长

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0602010

## 100 kHz Nd:YVO<sub>4</sub> Picosecond Regenerative Amplifier End-Pumped by 914 nm Laser Diode

Chen Meng Chang Liang Yang Chao Chen Liyuan Li Gang

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

**Abstract** 914 nm wavelength in-band pumping of Nd:YVO<sub>4</sub> reduces crystal thermal load and end-surface thermal stress, then the performance of Nd:YVO<sub>4</sub> regenerative amplifier is enhanced at high repetition rate. The influence of high-voltage-duration applied to Pockel-cell on Nd:YVO<sub>4</sub> regenerative amplifier with output pulse stability of 100 kHz is investigated in detail. When 68 W pumping power at 914 nm center wavelength is absorbed by the Nd:YVO<sub>4</sub> crystal and appropriated high-voltage-duration is applied to Pockel-cell, the Nd:YVO<sub>4</sub> regenerative amplifier that produces stable 21.2 W average power at 100 kHz repetition rate is seeded by a low power of 1 nJ and 5.7 ps duration semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub> laser with repetition rate of 42.7 MHz.

**Key words** laser technique; all-solid-state laser; regeneration amplifier; pico-second pulse; Nd:YVO<sub>4</sub> crystal; 914 nm wavelength

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

## 1 引 言

Nd:YVO<sub>4</sub> 是目前高重复频率、高平均功率 1064 nm 皮秒激光再生放大器增益晶体的首选激光晶体, 然而其相对低的断裂阈值<sup>[1]</sup>限制了 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体抽运功率的提高。以质量分数为 0.5% 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 为例, 采用中心波长 808 nm 的半导体激光器端面抽运, 在抽运光斑直径为 0.8 mm 时, 可承受的最大注入抽运光功率为 36 W。为了解决这个问题, 通常采用以下方法: 端面键合未掺杂端帽<sup>[2,3]</sup>、双端抽运结构<sup>[4]</sup>、降低掺杂浓度<sup>[5]</sup>、采用吸收系数较低的波长抽运<sup>[6]</sup>等。其中采用低吸收系数波

长抽运一方面可降低 Nd:YVO<sub>4</sub> 端面热应力提高注入的抽运功率, 另一方面可提高量子效率, 降低整个晶体的热负荷。

本文利用最大输出功率为 95 W、中心波长为 914 nm 的光纤耦合半导体激光器作为 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的抽运源, 搭建了 100 kHz Nd:YVO<sub>4</sub> 皮秒再生放大器, 详细研究了普克尔盒加压脉宽对百千赫兹 Nd:YVO<sub>4</sub> 皮秒再生放大器输出脉冲稳定性的影响, 实现了稳定的 100 kHz、单脉冲能量 212 μJ 的 914 nm 抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub> 皮秒再生放大输出。

**收稿日期**: 2013-02-28; **收到修改稿日期**: 2013-04-10

**基金项目**: 国家自然科学基金(61144007)资助课题。

**作者简介**: 陈 檬(1963—), 女, 副研究员, 主要从事全固态纳秒、皮秒、倍频激光器件及技术等方面的研究。

E-mail: chenmeng@bjut.edu.cn

## 2 实验装置

再生放大器实验光路示意图如图 1 所示,其中激光工作物质为掺杂原子数分数为 0.5%、沿  $a$  轴切割的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,尺寸为 4 mm×4 mm×30 mm;抽运光为 914 nm 光纤耦合半导体激光器,最大输出功率为 95 W,光纤芯径为 400 μm; L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub> 为 1:3 倍准直聚焦透镜,激光晶体内抽运光焦斑处光斑直径约为 1200 μm。腔镜 M<sub>3</sub> 和 M<sub>4</sub> 为弯月镜,用来补偿在高抽运功率下的热透镜效应,凹面镀对 914 nm 的增透膜,凸面镀对 1064 nm 高反和 914 nm 高透的膜系;其他腔镜 M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>、M<sub>5</sub> 和 M<sub>6</sub> 为对 1064 nm 凹面全反镜;再生放大腔长为 1.89 m,对应激光在谐振腔内往返一周的时间为 12.6 ns; TFP<sub>1~4</sub> 为薄膜偏振片;种子光源为半导体抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub> 半

导体可饱和吸收镜 (SESAM) 锁模激光器,波长为 1064 nm,输出功率为 100 mW,重复频率为 42.8 MHz,脉冲宽度为 5.7 ps。水平偏振种子光由反射镜 M<sub>8</sub>、M<sub>9</sub> 经法拉第光隔离器系统[包括 TFP<sub>3</sub>、1/2 波片、法拉第旋转器 (FR)]、偏振片 TFP<sub>2</sub> 导入再生放大腔;往返经过 1/4 波片和 β 相偏硼酸钡晶体普克尔盒 (BBO-PC),偏振态旋转 90° 后被 TFP<sub>2</sub> 反射到再生放大腔的其余光学元件上。功率计 PM<sub>2</sub> 用来测量未被激光晶体吸收的抽运光,功率计 PM<sub>1</sub> 用来测量再生放大输出激光功率,快速光电探测器 PIN<sub>1</sub> (带宽为 12 GHz) 用来探测输出的光脉冲波形, PIN<sub>2</sub> (带宽为 7.5 GHz) 探测腔内种子光成长过程。当腔内激光晶体吸收了 67.6 W、914 nm 抽运光时,再生放大腔有最大的输出,输出平均功率为 25 W。

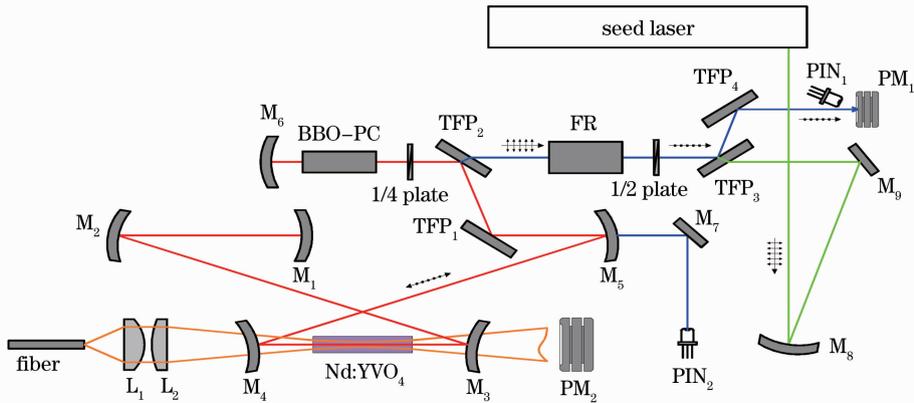


图 1 100 kHz、914 nm 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 皮秒激光再生放大光路图

Fig. 1 Optical layout of 914 nm LD end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> picosecond regenerative amplifier with 100 kHz

## 3 实验结果分析

种子光在再生放大腔内经过多次往返,增益达到最大,此时将放大后的种子光导出(参见图 2)。

普克尔盒加压脉宽  $\tau_{GL}$  对应种子光在腔内的往返次数,图 3 为  $\tau_{GL} = 88.2$  ns 时示波器探测的 100 kHz 触发脉冲序列和再生放大器输出的光脉冲序列。采用的示波器为 Tektronix DPO 70604C 型数字荧光示

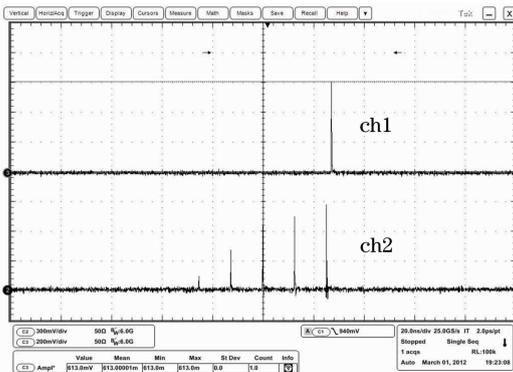


图 2 再生放大成长过程内腔波形(ch2)和单脉冲输出波形(ch1)

Fig. 2 Waveform of intra-cavity (ch2) and single pulse output (ch1) of regenerative amplifier

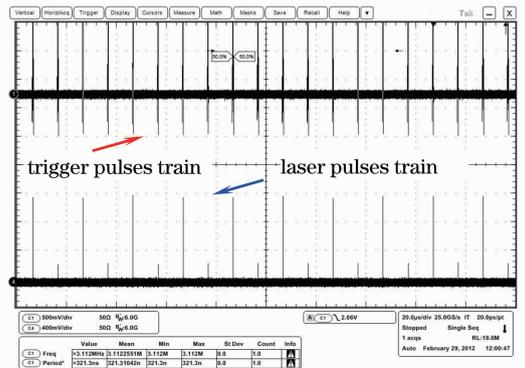


图 3 100 kHz 再生放大触发脉冲序列和激光输出脉冲序列

Fig. 3 Waveform of trigger pulses train and laser pulse train of 100 kHz regenerative amplifier

波器,带宽为 6 GHz,采样率为 25 GS/s。

图 3 表明此时再生放大器输出的光脉冲存在一高一低两个能量值,这就是所报道的倍周期现象<sup>[7~11]</sup>。为了获得稳定的 100 kHz,Nd:YVO<sub>4</sub> 再生放大器输出,进一步研究了普克尔盒加压脉宽  $\tau_{GL}$  对输出脉冲稳定性的影响。实验中以 12.6 ns 为步长

改变加压脉宽,发现当  $\tau_{GL} \leq 63.0$  ns 时,再生放大输出稳定的单一能量脉冲[如图 4(a)和(b)];当  $63.0$  ns  $< \tau_{GL} < 100.8$  ns 时,输出脉冲存在一高一低两个能量值,并且能量差值随加压脉宽增加而增大[如图 4(c)和(e)所示];进一步增加普克尔盒加压脉宽,输出脉冲能量无规律[如图 4(f)和(h)所示]。

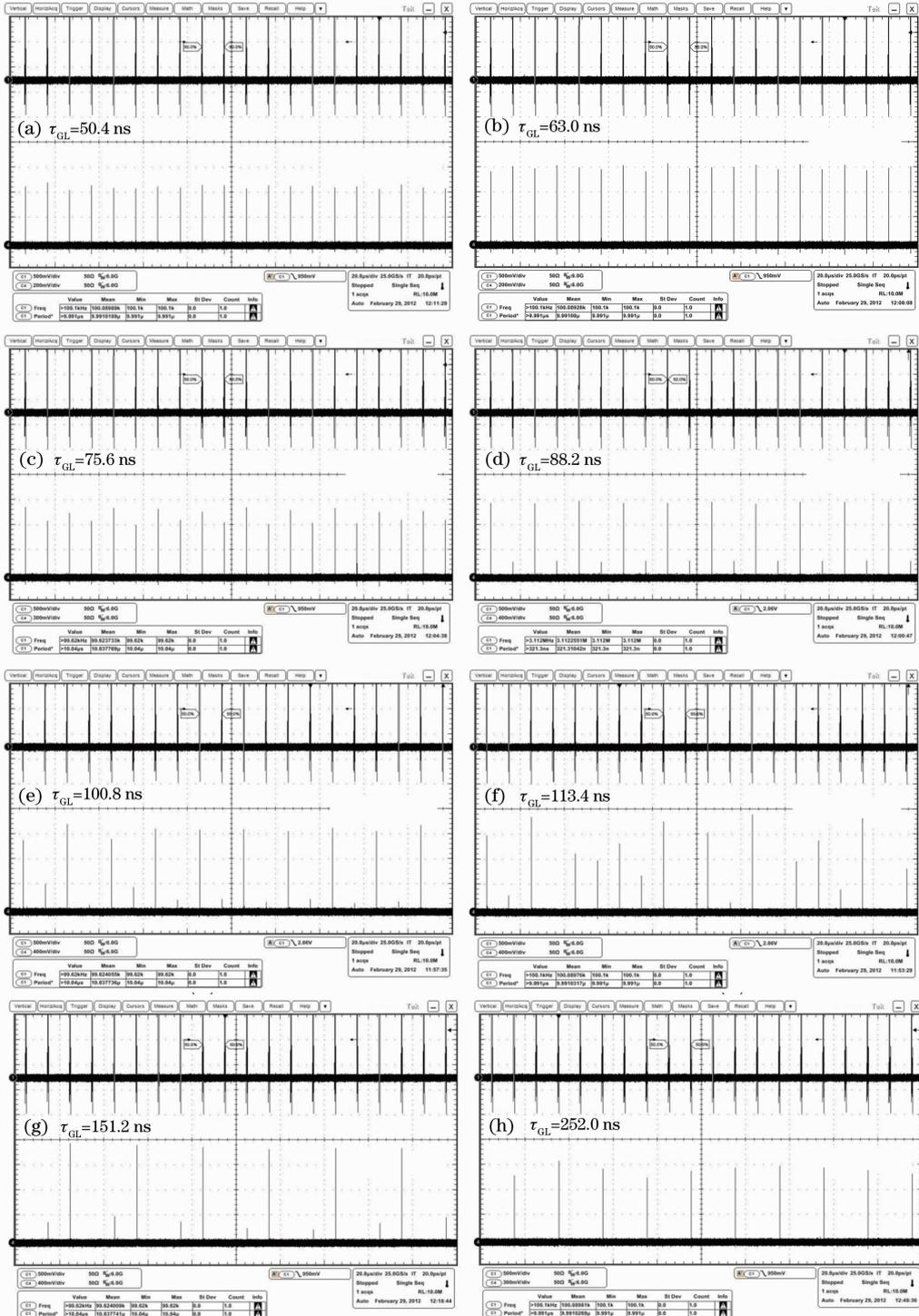


图 4 再生放大输出激光脉冲序列稳定性波形

Fig. 4 Stability waveform of regenerative amplifier output pulse train

测量了 Nd:YVO<sub>4</sub>再生放大器在 100 kHz 重频下平均输出功率随普克尔盒加压脉宽的变化曲线,如图 5 所示,其中圆点表明此时输出稳定的单一能量脉冲,三角形则表明此时输出的激光脉冲能量不稳定。在最大输出功率 25 W 处,对应  $\tau_{GL} = 100.8$  ns,此时输出脉冲能量值不稳定;输出单一稳定脉冲对应的最大输出功率为 21.2 W。

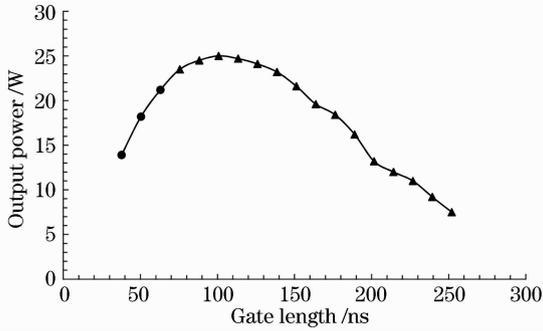


图 5 重复频率为 100 kHz 时, Nd:YVO<sub>4</sub>再生放大器输出激光功率随加压脉冲宽度的变化

Fig. 5 Output power of Nd:YVO<sub>4</sub> regenerative amplifier versus gate length at 100 kHz repetition rate

## 4 结 论

利用 914 nm 波长抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体,降低了晶体端面热应力,实现了掺杂原子数分数为 0.5% 的单端注入抽运功率 95 W;根据热应力分析,还可将抽运功率提高到 150 W。

在低功率皮秒种子注入下,通过控制普克尔盒加压脉宽,获得了稳定的 100 kHz Nd:YVO<sub>4</sub>皮秒激光再生放大输出;实现了 914 nm 抽运的 100 kHz Nd:YVO<sub>4</sub>皮秒再生放大输出,输出平均功率为 21.2 W,光-光转换效率为 31.4%,单脉冲能量为 212  $\mu$ J。

100 kHz Nd:YVO<sub>4</sub>皮秒再生放大器稳定工作是在减小普克尔盒加压脉宽,减少种子光在腔内往返次数,即牺牲腔内增益的条件下获得的,因此 100kHz

的重复频率不是 Nd:YVO<sub>4</sub>再生放大器最佳的工作频率。为了避免出现倍周期等输出光脉冲能量不稳定现象,Nd:YVO<sub>4</sub>再生放大器工作频率需大于 300 kHz,相关研究将在后续文章中报道。

## 参 考 文 献

- 1 X. Peng, A. Asundi, Y. Chen. Study of the mechanical properties of Nd:YVO<sub>4</sub> crystal by use of laser interferometry and finite-element analysis[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(9): 1396~1403
- 2 Y. T. Chang, Y. P. Huang, K. W. Su. Comparison of thermal lensing effects between single-end and double-end diffusion-bonded Nd:YVO<sub>4</sub> crystals for  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$  and  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  transitions[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(25): 21155~21160
- 3 Zhao Zhigang, Dong Yantao, Pan Sunqiang *et al.*. 50 W class double-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> TEM<sub>00</sub> mode solid state laser oscillator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0902001
- 4 赵智刚,董延涛,潘孙强等. 50 W 量级双端抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 基模固体激光振荡器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0902001
- 5 X. Ya, Q. Liu, M. Gong. High-repetition-rate high-beam-quality 43 W ultraviolet laser with extra-cavity third harmonic generation[J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **95**(2): 323~328
- 6 Zhang Hongrui, Gao Mingyi, Zheng Yi *et al.*. Performance of Nd:YVO<sub>4</sub> laser with lower Nd<sup>3+</sup> doped concentration[J]. *Laser & Infrared*, 2003, **33**(2): 115~117
- 7 张红瑞,高明义,郑义等. 低掺杂浓度 Nd:YVO<sub>4</sub>激光器的输出特性研究[J]. *激光与红外*, 2003, **33**(2): 115~117
- 8 Ai Qingkang, Chang Liang, Chen Meng *et al.*. Thermal analysis of Nd:YVO<sub>4</sub> pumped by 808 nm and 888 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0402001
- 9 艾庆康,常亮,陈檬等. 808 nm 与 888 nm 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>热效应分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0402001
- 10 J. Dorring, A. Killi, U. Morgner. Period doubling and deterministic chaos in continuously pumped regenerative amplifiers [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(8): 1759~1768
- 11 M. Grishin, V. Gulbinas, A. Michailovas. Dynamica of high repetition rate regenerative amplifiers [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(5): 9434~9443
- 12 David A. Clubley, Angus S. Bell, Graham Friel. High average power Nd:YVO<sub>4</sub> based pico-second regenerative amplifier[C]. *SPIE*, 2008, **6871**: 68711D
- 13 M. Luhrmann, F. Harth, C. Theobald. High average power Nd:YVO<sub>4</sub> regenerative amplifier seeded by a gain switched diode laser [C]. *SPIE*, 2011, **7912**: 791210
- 14 M. Grishin, V. Gulbinas, A. Michailovas. Bifurcation suppression for stability improvement in Nd:YVO<sub>4</sub> regenerative amplifier[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(18): 15700~15708

栏目编辑: 张 腾