

文章编号: 0258-7025(2008)02-0187-04

# 高稳定激光二极管抽运 Nd:YLF 再生放大器

王江峰 朱海东 李学春 朱健强

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 设计并实现了一种放大纳秒激光脉冲的高稳定的激光二极管(LD)抽运 Nd:YLF 再生放大器。为了获得高稳定的输出,再生放大器工作在饱和状态。此时,再生放大器输出稳定性最好,而且注入激光脉冲能量波动引起的输出激光脉冲波动被抑制。由于增益饱和效应,再生放大器输出脉冲出现时域波形失真,附加后缀脉冲能够减弱时域波形失真。放大器工作波长 1053 nm,工作频率 1 Hz。输入 240 pJ 的 3 ns 方波激光脉冲,输出激光脉冲能量 4.2 mJ,总增益大于  $10^7$ ,不稳定性小于 1%(均方根),方波扭曲 1.33。为 3 ns 方波激光脉冲引入其本身幅度 0.75 倍的后缀脉冲,输出激光脉冲方波扭曲由 1.33 降至 1.17。

**关键词** 激光技术;再生放大;多程放大;激光二极管抽运

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Highly Stable, Laser Diode-Pumped Nd:YLF Regenerative Amplifier

Wang Jiangfeng Zhu Haidong Li Xuechun Zhu Jianqiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** A highly stable, laser diode (LD)-pumped, all-solid-state Nd:YLF regenerative amplifier applied to amplify a nanosecond laser pulse is designed and realized. The maximum output energy and the best stability of the regenerative amplifier can be obtained when it operates in a saturated mode for all pulse duration and temporal profiles. In addition to the excellent stability, the output laser pulse fluctuation caused by the injected pulse energy fluctuation is inhibited. Extra post-pulse can decrease the temporal pulse profile distortion caused by the gain saturation effect. When the regenerative amplifier is seeded with a 240 pJ, 3 ns optical pulse, output energy of 4.2 mJ with an overall energy gain more than  $10^7$  and output energy instability better than 1% (root-mean-square) are obtained. When an extra post-pulse with amplitude of 0.75 times of the seed pulse is added for a 3 ns optical square seed pulse, the square-pulse distortion is decreased from 1.33 to 1.17.

**Key words** laser technique; regenerative amplification; multi-pass amplification; laser diode-pump

## 1 引 言

在许多大能量激光源中,例如惯性约束聚变激光装置,脉冲产生部分输出合适的时域波形与光谱特征的低能量激光脉冲,然后经过一级或多级放大器放大提高激光脉冲能量。高增益再生放大器的应用可以减少此类系统的放大级数<sup>[1]</sup>。种子激光脉冲注入再生放大器谐振腔,在腔内实现多程放大<sup>[2]</sup>,然后通过电光开关导出腔外。再生放大器能够大量高效提取激光介质的存储能量,实现小信号激光脉冲

若干数量级的高增益放大。激光二极管(LD)抽运源的使用,进一步促进了再生放大器的发展。与闪光灯抽运源相比,激光二极管抽运的放大器更加可靠稳定,结构紧凑,并且提高了系统效率,降低了热耗散<sup>[3,4]</sup>。激光二极管抽运的再生放大器广泛应用于纳秒激光脉冲放大<sup>[5~7]</sup>和超短激光脉冲放大<sup>[8~10]</sup>。

本文介绍了一台激光二极管抽运的 Nd:YLF 再生放大器,工作波长 1053 nm,输入 240 pJ 的 3 ns

收稿日期:2007-05-17;收到修改稿日期:2007-07-17

基金项目:国家 863-416 计划资助项目。

作者简介:王江峰(1981—),男,陕西人,博士研究生,主要从事高功率固体激光器前端系统中再生放大器的研究。

E-mail:wajfeng@163.com

导师简介:李学春(1972—),男,吉林人,研究员,博士生导师,主要从事激光技术与光纤应用的研究。

E-mail:lixuechun@siom.ac.cn

方波激光脉冲,放大器实现大于  $10^7$  的增益,输出激光脉冲能量达到 4.2 mJ, 1 h 内不稳定性小于 1% (均方根),方波扭曲 1.33。

## 2 放大器设计

再生放大器设计放大最大脉宽 3 ns 的特定区域波形种子激光脉冲。再生放大器必须保证注入激光脉冲能够完整地电光开关导入和导出放大器谐振腔,避免由于电光开关动作引起的激光脉冲时域波形失真。也就是说,谐振腔内单次循环时间  $T_p$  满足<sup>[11]</sup>

$$T_p \geq T_p + T_s, \quad (1)$$

式中  $T_p$  为电光开关的开关转换时间,  $T_s = 3$  ns, 为注入激光脉冲脉宽。实验中使用的电光开关转换时间小于 9 ns, 需要  $T_{rp} > 12$  ns。线性谐振腔光学长度  $L = cT_p/2$ ,  $c$  表示光速。因此需要长度大于 1.8 m 的线性谐振腔。

激光二极管抽运 Nd:YLF 再生放大器实验装置结构如图 1 所示。放大器采用线性折叠腔,腔长为 4 m, 单次循环时间 27 ns。焦距 3 m 的凸透镜置于腔中央,谐振腔构成稳定腔,稳定值  $g^2 = 0.11$ 。平面反射镜  $M_1$  与  $M_2$  组成谐振腔,全反镜  $M_3$ ,  $M_4$  和  $M_5$  折叠谐振腔,使得放大器结构更加紧凑。激光二极管抽运的 Nd:YLF 晶体棒状放大器放置在距离  $M_2$  60 cm 的位置,以避免最大脉宽 3 ns 的注入激光脉冲在其内部重叠,而出现增益干涉和不规则的波形失真。Nd:YLF 棒长 6 cm, 直径 4 mm。抽运源为峰值功率 750 W 的准连续激光二极管阵列,采用侧面抽运方式,抽运光中心波长 797 nm, 其脉宽设置为 540  $\mu$ s, 再生放大器重复工作频率 1 Hz。抽运电流设置在 21 A, Nd:YLF 棒状放大器小信号单程增益 1.8, 谐振腔透过率 0.74, 单程净增益 1.33。

种子激光脉冲通过单模光纤注入再生放大器,

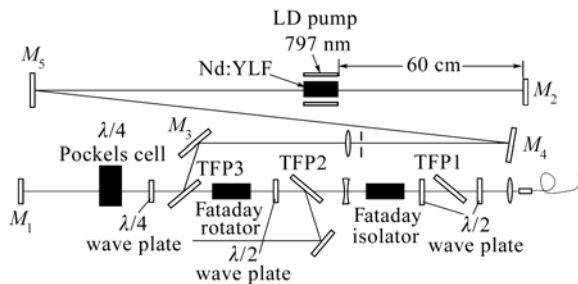


图 1 激光二极管抽运的 Nd:YLF 再生放大器实验装置

Fig. 1 Layout of the laser diode-pumped Nd:YLF regenerative amplifier

使用一个凸透镜和一个凹透镜实现输入光束空间模式与谐振腔本征模的模式匹配。法拉第隔离器防止再生放大器输出激光破坏光纤末端或者进入光纤,影响输出种子激光的前端单元的正常运行。通过改变电光开关的驱动电压,控制激光脉冲的偏振方向,电光开关和  $\lambda/4$  波片联合完成种子激光脉冲的注入与导出。薄膜偏振片 TFP2 与法拉第旋光器及  $\lambda/2$  波片组成一个与光束传输方向相关的偏振光学开关,能够将放大器谐振腔的输出激光脉冲引导出再生放大器。

## 3 再生放大器运行与实验结果

再生放大器能够实现低能量激光脉冲几个数量级的增益放大。在不考虑增益饱和的情况下,再生放大器总增益  $G_{total} = G_{net}^k$ , 其中,  $G_{net}$  为再生放大器谐振腔单程净增益,  $k$  表示激光脉冲在谐振腔内的循环次数。

实际上,随着  $k$  增大,再生放大器的总增益最终取决于增益介质的存储能量。放大过程中,激光脉冲不断地提取放大器的存储能量,腔内单程增益逐渐减小,放大器逐渐进入饱和状态。当  $G_{net} = 1$  时,放大器腔内增益等于损耗,激光脉冲能量最大。之后,因为放大器饱和,随着  $k$  的增加,总增益逐渐减小。

实验中采用的注入激光脉冲为脉宽 3 ns 的方波脉冲,能量 240 pJ。图 2 是再生放大器输出能量与腔内循环次数的关系,坐标系纵轴为对数坐标。激光脉冲在腔内循环 30 次时,输出能量最大,输出能量 4.2 mJ, 之后,放大器饱和,放大器输出能量随着腔内循环次数的增加而降低。在测量过程中,由于测量范围大,使用多个衰减片帮助测量。每次当输出

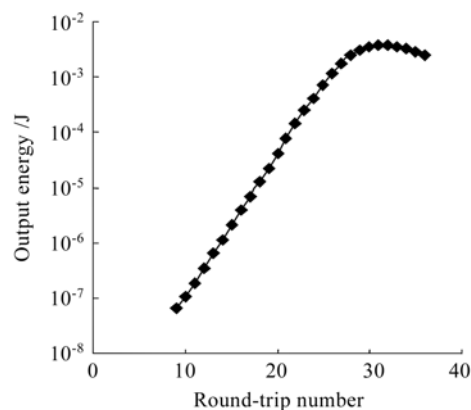


图 2 再生放大器输出能量与腔内循环次数的关系

Fig. 2 Relation between output energy of the regenerative amplifier and the round-trip number

能量达到最大量程时,调整衰减片,增大衰减倍数,重新测量上一个值,以获得比较准确的衰减变化。

在不考虑饱和的情况下,再生放大器输出能量变化量  $\Delta E_{out}$  可以简单表示为

$$\frac{\Delta E_{out}}{E_{out}} = \frac{\Delta E_s}{E_s} + 2k\Delta g, \quad (2)$$

式中  $E_s$  为输入的种子激光脉冲能量,  $\Delta g$  指的是 Nd:YLF 棒状放大器小信号单程增益  $G$  的指数项变化  $G = \exp(g)$ , 由抽运源的不稳定引起<sup>[12]</sup>。可以看出,激光脉冲在腔内往返次数越多,输出能量变化越大。但是,随着激光脉冲的不断放大,增益介质储能不断消耗,放大器逐渐进入饱和状态。在放大器进入饱和状态的过程中,放大器的输出将趋于稳定。图 3 记录了实验中再生放大器输出波形峰值波动与腔内循环次数之间的关系,可以看出,当腔内循环次数小于 25 时,随着放大程数的增加,放大器输出稳定度趋于增大;当循环次数大于 25 时,放大器逐渐进入饱和状态,其输出稳定度逐渐减小。在近饱和状态,由于注入激光脉冲波动引起的输出激光脉冲波动也被抑制,如图 4 所示,注入激光脉冲变化达到 50%,再生放大器输出能量变化小于 5%。

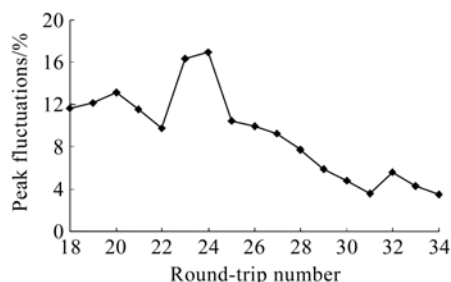


图 3 再生放大器输出稳定度随腔内循环次数的变化  
Fig. 3 Output-pulse-energy fluctuation of round-trip number in the regenerative amplifier

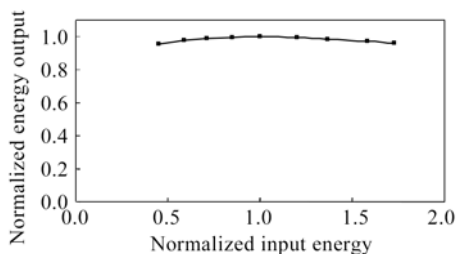


图 4 腔内循环次数为 30 时,再生放大器输入变化引起的输出能量变化

Fig. 4 Variations of output-pulse energy owing to variations of seed pulse in the regenerative amplifier

因此,我们设定再生放大器电光开关导出时间,保证激光脉冲在谐振腔内循环 30 次,此时,输出激

光脉冲能量最大,更加稳定,并对出入能量变化不敏感。放大器输出能量 4.2 mJ,总增益大于  $10^7$ ,不稳定性小于 1% (均方根),图 5,6 分别为再生放大器 1 h 内的输出能量变化与输出时间波形叠加。

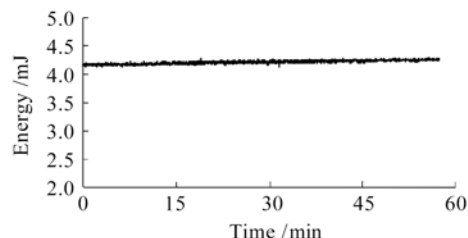


图 5 再生放大器 1 h 内的输出能量变化  
Fig. 5 Output-pulse-energy variations of the regenerative amplifier in 1 hour

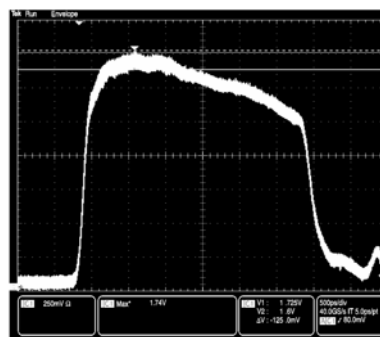


图 6 再生放大器 1 h 内输出激光脉冲的时间波形叠加  
Fig. 6 Oscilloscope trace of output pulse in 1 hour in the regenerative amplifier

由于增益饱和效应,再生放大器输出脉冲出现时间波形失真。如果注入方波激光脉冲,这种失真表现在输出脉冲前沿高于后沿。使用方波扭曲表征这种由于饱和效应引起的失真,方波扭曲表示为失真的方波脉冲前沿与后沿的百分比。方波扭曲不利于后续激光器放大,前端可以通过调整种子激光的时间波形对其进行预补偿。但是,过大的方波扭曲增加了预补偿的难度和准确度。对输入脉冲附加后缀脉冲可以降低方波扭曲。附加后缀脉冲在再生放

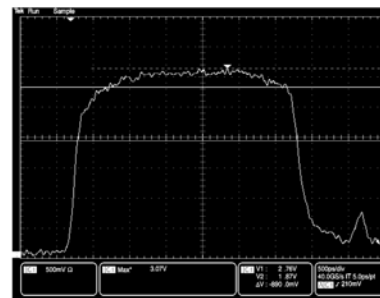


图 7 注入再生放大器的 3 ns 方波激光脉冲  
Fig. 7 Three ns square optical pulse injected into the regenerative amplifier

大器之后的电光隔离器中被消除。

图 7 是注入再生放大器的 3 ns 方波激光脉冲, 放大器输出激光脉冲方波扭曲为 1.33 (如图 8)。为 3 ns 方波激光脉冲引入其本身幅度 0.75 倍的后缀脉冲, 主脉冲与后缀脉冲间隔 11.3 ns, 输出激光脉冲方波扭曲由 1.33 降至 1.17 (如图 9)。

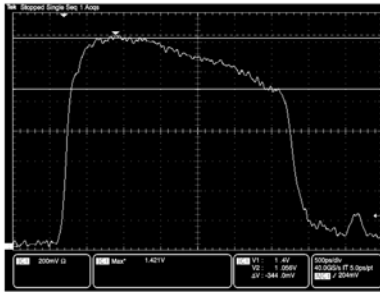


图 8 再生放大器输出的脉冲波形

Fig. 8 Output-pulse shape of regenerative amplifier

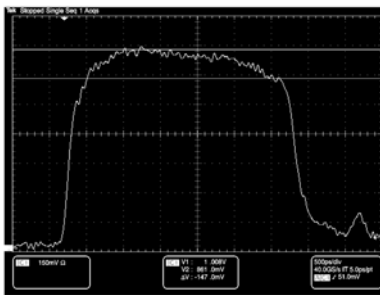


图 9 附加后缀脉冲时再生放大器输出的脉冲波形

Fig. 9 Output-pulse shape of regenerative amplifier with the extra post-pulse

## 4 结 论

设计并实现了一种应用于纳秒激光脉冲放大的激光二极管抽运 Nd:YLF 再生放大器, 研究了激光脉冲在放大器谐振腔内循环次数与对输出稳定度的影响, 并实现了一种简单的降低方波扭曲的方法。放大器输出激光脉冲能量 4.2 mJ, 总增益大于  $10^7$ , 不稳定性小于 1%, 方波扭曲 1.33。采用附加后缀脉冲技术, 方波扭曲降至 1.17。

## 参 考 文 献

- Philippe Bado, Maurice Pessot, Jeff Squier *et al.*. Regenerative amplification in alexandrite of pulses from specialized oscillators [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(6):1167~1171
- Wang Zhitong, Chen Sanbin. Experimental study of diode side-pumped Nd:YLF multi-pass amplification [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5):590~592  
王之桐, 陈三斌. 激光二极管侧抽运 Nd:YLF 多程放大实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5):590~592
- H. Liu, S. Biswal, J. Paye *et al.*. Directly diode-pumped millijoule subpicosecond Yb:glass regenerative amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(13):917~919
- Wu Deyong, Lü Wenqiang, Wei Bing *et al.*. Study on high average power diode laser used in pumping [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(SO):56~58  
武德勇, 吕文强, 魏彬等. 泵浦用高平均功率二极管激光器研制[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(SO):56~58
- Wei Hui, Zhang Shengjia, Xu Shizhong *et al.*. LDA pumped Nd:YLF regenerative amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):677~680  
韦辉, 张生佳, 许世忠等. LDA 抽运 Nd:YLF 再生放大器的实验研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8):677~680
- A. Babushkin, W. Bittle, S. A. Letzring *et al.*. Regenerative amplifier for the OMEGA laser system [C]. *SPIE*, 1998, **3492**:124~130
- Wang Chun, Chen Shaohua, Ma Zhonglin *et al.*. LDA pumped Nd:YAG regenerative amplifier of single longitudinal mode laser pulse [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(7):820~824  
王春, 陈绍和, 马忠林等. 激光二极管阵列抽运的单纵模激光脉冲再生放大器[J]. *光学学报*, 2001, **21**(7):820~824
- Alan Braun, Xinbing Liu, Gerard Mourou *et al.*. Diode-pumped Nd:glass kilohertz regenerative amplifier for subpicosecond microjoule level pulses [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(18):4165~4167
- C. Hönninger, I. Johannsen, M. Moser *et al.*. Diode-pumped thin-disk Yb:YAG regenerative amplifier [J]. *Appl. Phys. B*, 1997, **65**:423~426
- Yu Lianjun, Cheng Guanghua, Wang Yishan *et al.*. Without stretcher, compacted, and high beam quality, high repetition rate Ti:sapphire femtosecond pulse amplifier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **31**(1):1~3  
于连君, 程光华, 王屹山等. 无展宽器的高重复率钛宝石啁啾飞秒脉冲再生放大器的研究[J]. *光子学报*, 2004, **31**(1):1~3
- Ian N. Ross, Marta Csatári, Steve Hutchins *et al.*. High-performance diode-pumped Nd:YLF amplifier [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(6):1040~1047
- J. K. Crane, F. Penko, M. Martinez *et al.*. Diode-pumped regenerative amplifier for the NIF laser system [C]. ICF Quarterly Report, Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-LR-105821-97-4, 1997. 246~260