

文章编号: 0258-7025(2003)08-0677-04

LDA 抽运 Nd:YLF 再生放大器的实验研究

韦辉¹, 张生佳¹, 许世忠¹, 马忠林¹, 沈磊¹, 曾文章², 陈绍和¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 泉州师范学院物理系, 福建 泉州 362000)

摘要 研制了一台激光二极管阵列(LDA)抽运的 Nd:YLF 再生放大器。再生放大器工作波长 1053 nm, 重复频率 1 Hz, 输出 4 ns 宽基横模 TEM₀₀ 激光脉冲的能量为 2 mJ。总放大倍数达到了 1×10^7 , 输出能量稳定性优于 $\pm 4.7\%$ (峰值)。给出了再生放大器的实验装置和有关实验结果。

关键词 激光技术; 再生放大; 多程放大; 激光二极管阵列

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

LDA Pumped Nd:YLF Regenerative Amplifier

WEI Hui¹, ZHANG Sheng-jia¹, XU Shi-zhong¹,

MA Zhong-lin¹, SHEN Lei¹, ZENG Wen-zhang², CHEN Shao-he¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
(² Department of Physics, Quanzhou Teacher's College, Quanzhou, Fujian 362000, China)

Abstract A LDA pumped Nd:YLF regenerative amplifier has been developed, which works at wavelength of 1053 nm and repetition rate of 1 Hz. It can produce laser pulses of 2 mJ energy, 4ns width and base transverse mode TEM₀₀. Total gain of 1×10^7 is reached, and pulse-to-pulse energy fluctuation didn't exceed $\pm 4.7\%$ (peak). Experiment setup and detailed results are presented in this paper.

Key words laser technique; regenerative amplifier; multi-pass amplifier; laser diode arrays

1 引言

最近十几年以来,再生放大器(Regenerative Amplifier)得到了广泛的应用和发展。它作为一种产生高稳定度、高峰值功率、超短同步激光脉冲的有效手段,即使在较高的重复频率下也能够提供极高的增益($\sim 10^7$),并且引入的时间波形畸变和附加噪声都很小。Lowdermilk 和 Murray 的前期工作奠定了再生放大器用于放大皮秒红外脉冲的基础^[1,2]。再生放大器区别于传统行波放大器的特征是多程放大,再生放大过程包括种子脉冲注入谐振腔、多程放大和腔倒空三个步骤。

再生放大器的发展与其他先进光学技术的应用密切相关。近几年发展起来的激光二极管阵列(LDA)抽运技术与传统的脉冲氙灯抽运技术相比,

具有一系列突出的优点:1) 抽运效率高;2) 工作寿命长;3) 高的频率和功率稳定性;4) 为全固态器件,结构紧凑、性能可靠。随着 LDA 功率的提高和价格的不断下降,它的应用范围将越来越广。另一方面,正如理论所预言的,已经证明用 Nd:YLF 作为再生放大器的工作物质比 Nd:YAG 具有更显著的优势。因为 Nd:YLF 材料具有更宽的带宽、更长的荧光寿命、弱的热透镜效应、更强的自然双折射和极化振荡,这些因素有利于在基横模 TEM₀₀ 下获得更短的脉冲和更高的效率。

近年来,我们先后研制了脉冲氙灯抽运的^[3]、Nd:YAG 作为增益介质的再生放大器^[4]。在此基础上,又成功研制了一台 LDA 抽运的 Nd:YLF 再生放大器,输出的单脉冲能量为 ~ 2 mJ, 能量稳定性优于 $\pm 4.7\%$ 。

收稿日期:2002-04-18; 收到修改稿日期:2002-06-13

作者简介:韦辉(1974—),男,壮族,广西桂林人,现为中国科学院上海光学精密机械研究所博士生,主要从事激光脉冲整形和 LD 抽运固体激光器的研究。E-mail:weihuish@21cn.com

2 实验装置

再生放大器的实验装置如图 1 所示。谐振腔采用了折叠的线性驻波腔结构,腔镜 M_1 为全反射镜,腔镜 M_2 的透过率 $T=4\%$,谐振腔的中部放一焦距 $f=2\text{ m}$ 的凸透镜 L_2 ,使之构成稳定腔。一个 $\phi 2\text{ mm}$ 的小孔把谐振腔的振荡模式限制在高斯基横模 TEM_{00} 上。输出光斑的光学质量也将由该小孔决定,激光脉冲在谐振腔内往返次数越多,最终形成的输出模式的空间质量越好。考虑到种子脉冲自身的

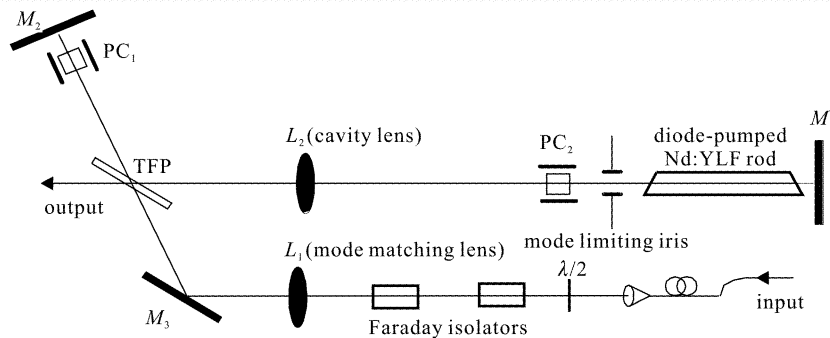


图 1 再生放大器实验装置

Fig. 1 Optical arrangement of regenerative amplifier

来自单模保偏传输光纤的种子脉冲先后经过两级法拉第光隔离器,模式匹配透镜 L_1 , M_3 和薄膜偏振镜 TFP,透射注入再生放大器。其中法拉第光隔离器的作用是防止再生放大器的强光反馈到光纤以前的主振荡器部分,以免影响主振荡器的稳定性。模式匹配透镜 L_1 的作用是使光纤的输出模式与谐振腔的固有模式一致,提高耦合效率。然后种子脉冲穿过普克尔盒 PC_1 ,由腔镜 M_2 反射回来再次穿过 PC_1 。由于之前 PC_1 上一直施加 $1/4$ 波电压,种子脉冲从 p 偏振变为 s 偏振。此时把 PC_1 上的电压退掉,于是种子脉冲的偏振态不再改变,在两个腔镜之间来回反射。光脉冲每往返一次,经过增益介质两次,能量不断放大。随着放大次数的增加,脉冲能量越来越大,而反转粒子数越来越少,增益逐渐变低。当增益达到饱和时,脉冲能量最大,此时在第二个普克尔盒 PC_2 上施加 $1/4$ 波电压,于是激光脉冲又从 s 偏振变成 p 偏振,透过 TFP 从谐振腔倒出,再生放大过程结束。

3 实验结果

纳秒级种子脉冲的获得是通过高压削波装置(图 2)来实现的: P_1, P_2 为一对正交的洛匈棱镜,两

宽度(底部宽 $\sim 5\text{ ns}$)、普克尔盒驱动电子线路的响应时间($\sim 12\text{ ns}$)以及延时抖动等,设计的谐振腔长 3.5 m ,相应的往返时间为 23.5 ns 。TFP 为对 s 偏振光高反射、对 p 偏振光高透射的薄膜偏振镜。抽运源为峰值功率 600 W 的激光二极管阵列,抽运光中心波长 797 nm ,工作电流脉宽设置为 $520\text{ }\mu\text{s}$,再生放大器重复工作频率 1 Hz 。激光工作物质采用 $\phi 4\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的 Nd:YLF 棒,LDA 和 Nd:YLF 棒均配有恒温水套和半导体致冷装置。采用侧面抽运方式,激光二极管的发光面环绕在 Nd:YLF 棒的周围。

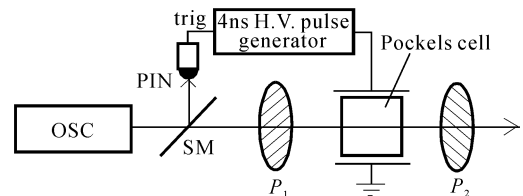


图 2 种子脉冲的产生

Fig. 2 Generation of seeding pulse

者之间是普克尔盒,平时普克尔盒上没有电压,削波装置处于完全关闭状态。当来自振荡器 OSC 的激光脉冲通过普克尔盒时,高压脉冲发生器同时产生一个 $\sim 4\text{ ns}$ 的高压脉冲加到普克尔盒上,于是激光偏振面发生旋转,一部分能量穿过 P_2 透射出来,经充分衰减后即种子脉冲。

实验中采用的种子光脉冲波形如图 3 所示。由于高压电脉冲存在反射波,所以种子脉冲表现为双峰结构,主脉冲的半高宽度为 3.856 ns ,副脉冲距主脉冲 7 ns ,强度约为主脉冲的 $1/5$ 。用美国阿波罗激光器公司 ALC 能量计测得种子脉冲的能量 $\sim 0.2\text{ nJ}$ 。

激光脉冲在放大过程中,每经过一次 TFP 便有一小部分激光会泄漏出去,因此观察漏光波形可以

了解再生放大的全过程。用 Hamamatsu R1328U-51 型高压强流光电管(上升时间 60 ps,下降时间 55 ps)和 Tektronix TDS724A 型数字荧光示波器记录的漏光波形如图 4,最初脉冲能量呈指数增长,当增益达到饱和时,脉冲能量最大。此后由于损耗大于增益,脉冲能量逐渐下降。可以算出线性放大区往返一次的增益约为 1.6 倍,采用低单程增益的目的是使激光脉冲在增益饱和之前经历足够的振荡次数(30~40 次),以获得较好的横模质量。

为了观察刚开始的几次放大过程,换用更高灵敏度的探测器后记录到的波形如图 5,种子脉冲注

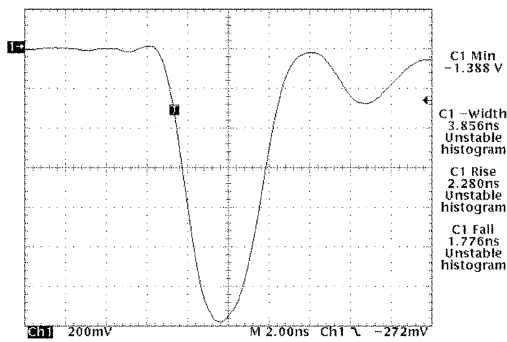


图 3 注入的种子脉冲
Fig. 3 Input seeding laser pulse

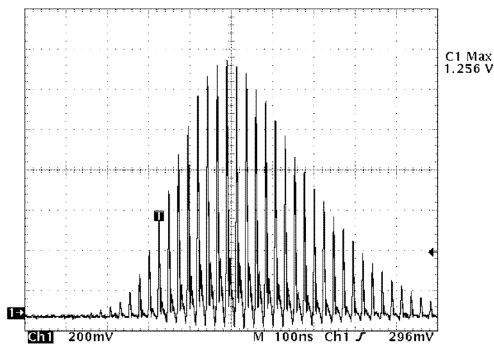


图 4 从 TFP 泄漏出的激光脉冲序列
Fig. 4 Pulse train detected as leakage through TFP

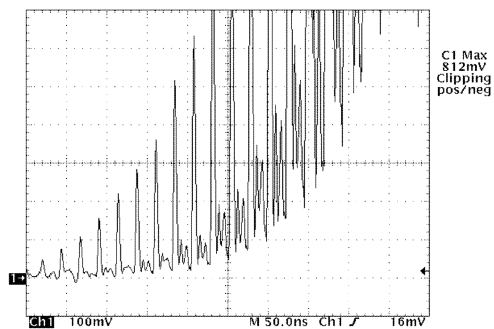


图 5 多程放大的开始
Fig. 5 Beginning of multi-pass amplification

入后很快就明显观察到放大现象,说明注入光的模式与再生放大器谐振腔的固有模式之间匹配得很好,注入效率高,容易起振。

当增益饱和时激光脉冲能量最大,此时第二个普克尔盒 PC₂ 打开,于是包络峰值处的激光脉冲从再生放大器倒出。倒出的单脉冲波形如图 6 所示,(a),(b)分别对应于示波器不同的扫描速度。

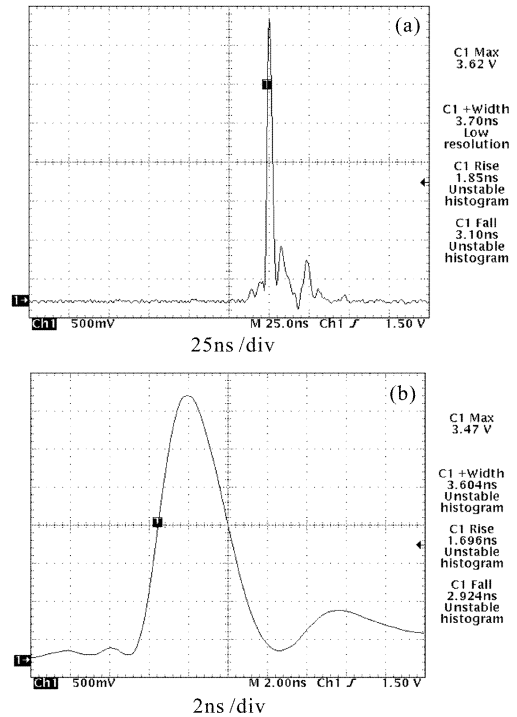


图 6 放大后倒出的单脉冲
Fig. 6 Output amplified pulse

图 6(a)的结果显示,倒出单脉冲前面的对比度大于 100:1;但后面还有一个较小的尾脉冲,这是由于 PC₂ 的 1/4 波电压不合适和驱动电子线路的响应时间较慢引起的。由图 6(b)可以看出,输出脉冲也为双峰结构,主脉冲宽度为 3.604 ns,副脉冲距主脉冲 7 ns,强度约为主脉冲的 1/5。比较图 3 的种子脉冲和图 6(b)的输出脉冲,可以看出两者的形状基本一致,脉冲的宽度和前沿时间也很接近。但后沿时间相差较大,我们认为这主要是由于两者能量相差太大(~7 个数量级),测试时采用了不同的仪器,其敏感波长和恢复时间特性略有差别所致。

用能量计测得倒出单脉冲的能量为 2 mJ,因此总放大倍数达到了 1×10^7 。输出脉冲波形连续 100 次的叠加如图 7 所示,能量稳定性达到 $\pm 4.7\%$ (峰值)。此处能量稳定性的定义为:(最大值-最小值) $\times 0.5$ /平均值。

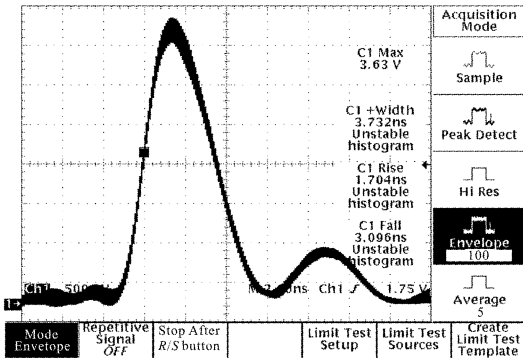


图 7 输出脉冲波形的 100 次叠加

Fig. 7 Oscilloscope trace of output pulse (100 times)

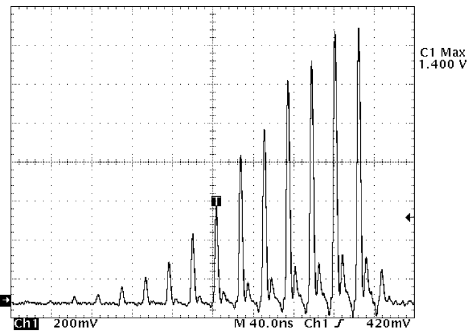


图 8 腔倒空后放大过程迅速截止

Fig. 8 Amplification stopped after cavity dumping

此时从腔镜 M_2 后面观察到的漏光波形如图 8, 单脉冲倒出后振荡过程迅速截止, 说明绝大部分能量已经从再生放大器中取出。

最后用 CCD 记录了输出脉冲的空间分布(图 9), 可见光斑的空间分布为类高斯分布。

4 分 析

如果不采取额外的稳幅措施, 输出稳定性很难超过 4.7%。这主要是由于抽运的不稳定性造成的, 根据输出稳定性与抽运稳定性的关系

$$\partial E_{\text{out}}/E_{\text{out}} \approx \ln(G_{\text{tot}}) \partial E_{\text{pump}}/E_{\text{pump}}$$

通常 G_{tot} 很高($10^7 \sim 10^9$), 例如为了获得 $\partial E_{\text{out}}/E_{\text{out}} \cong 2\%$ 的输出稳定性, 必须满足抽运稳定性 $\partial E_{\text{pump}}/E_{\text{pump}} < 0.1\%$, 实际上这是一个非常苛刻的要求。一般引起抽运不稳定的因素有: LDA 电源波动, LDA 发射光谱漂移, 环境温度起伏等等。

假设最初可以在谐振腔内引入一个由光强负反馈控制的可变损耗, 抑止放大过程, 建立一个能量较低、但非常平坦和稳定的脉冲序列中间态, 然后突然取消损耗, 于是多程放大的脉冲序列便由这个稳定

的中间态建立起来, 可望获得很高的输出稳定性。目前, 相关实验正在进之中。

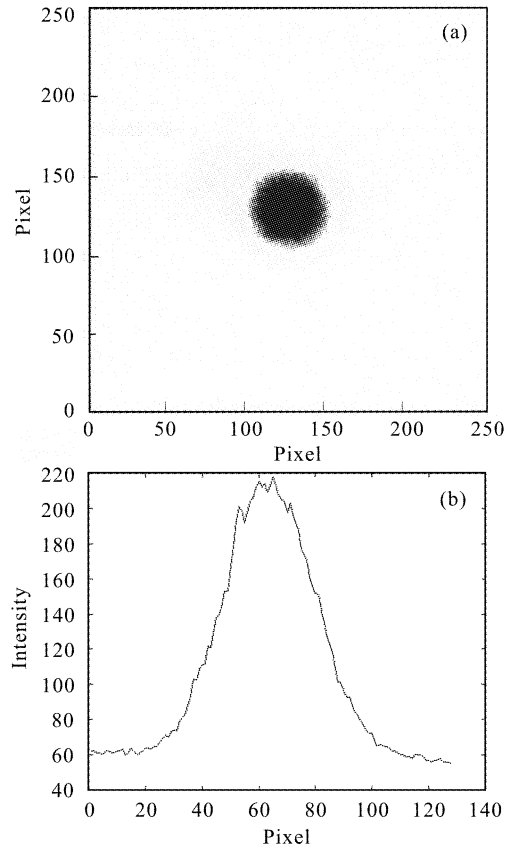


图 9 输出激光脉冲的光斑图像(a)及其一维光强分布(b)

Fig. 9 Near field pattern (a) and intensity profile (b) of output amplified pulse

5 结 论

采用折叠线性驻波腔结构的 LDA 抽运 Nd:YLF 再生放大器, 实现了对纳秒级纳焦耳能量激光脉冲的再生放大。总放大倍数达到 1×10^7 , 稳定性为 $\pm 4.7\%$, 放大后输出的单脉冲能量为 $\sim 2\text{mJ}$ 。输出光束空间分布为类高斯分布。

参 考 文 献

- 1 W. H. Lowdermilk, J. E. Murray. The multipass amplifier: Theory and numerical analysis [J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(5):2436~2444
- 2 J. E. Murray, W. H. Lowdermilk. Nd:YAG regenerative amplifier [J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(7):3548~3555
- 3 Shen Xiaohua, Chen Shaohu, Ge Xiaping *et al.*. Regenerative amplification of a single-longitudinal-mode laser pulse [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1995, **A22**(11):817~822 (in Chinese)
- 4 Wang Chun, Chen Shaohu, Ma Zhonglin *et al.*. LDA pumped Nd:YAG regenerative amplifier of single longitudinal mode laser pulse [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(7):820~824 (in Chinese)