

文章编号:1001-5078(2009)08-0852-03

· 激光器技术 ·

# 氙灯抽运锁模脉冲再生放大器研究

秘国江, 钟国舜, 邓明发, 毛小洁, 朱相帮, 孙维娜, 杨文是, 王伟力  
(固体激光技术国家级重点实验室, 北京 100015)

**摘要:**搭建了一套声光锁模为主振荡器, 氙灯抽运的再生放大系统。通过光路设计和精确的时间控制, 将脉冲单选模块集成到再生放大腔中。在工作频率 20 Hz 时, 再生放大器输出单脉冲能量  $\geq 3.2$  mJ, 能量放大倍数  $\geq 3 \times 10^4$ , 脉冲宽度 305 ps, 单脉冲输出 100%, 光束质量近衍射限。

**关键词:**主振荡器; 再生放大; 锁模脉冲序列; 脉冲单选

**中图分类号:** TN722      **文献标识码:** A

## Study on flashlamp-pumped mode-locked regenerative amplifier

BI Guo-jiang, ZHONG Guo-shun, DENG Ming-fa, MAO Xiao-jie, ZHU Xiang-bang,  
SUN Wei-na, YANG Wen-shi, WANG Wei-li  
(National Key Laboratory of Solid State Laser Technology, Beijing 100015, China)

**Abstract:** In this paper, the function of the usual pulse picker was integrated into the stage of regenerative amplifier by the optical configuration design and the precise control of time. Using the improved regenerative amplifier, the output pulse energy of 3.2 mJ is obtained, which the net gains over  $3 \times 10^4$  at 20 Hz repetition rate with 305 ps of pulse duration, and its beam quality near the limited.

**Key words:** main oscillator; regenerative amplifier; mode-locked laser shots; single pulse select

### 1 引言

高重复频率的超短激光脉冲具有高峰值功率、高光束质量、窄脉宽、时间波形光滑等优点, 在军事、科研、工业精细加工、医疗和生物研究等领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。再生放大器作为一种获得高稳定性、高重复频率超短激光脉冲的重要技术, 在近几年得到了快速的发展。特别是随着新型高频电光晶体的出现和驱动源技术的发展, 再生放大器的工作频率和单脉冲能量不断提高。2005年, 德国科研人员已经实现了重复频率 200 kHz, 单脉冲能量 65  $\mu$ J, 脉宽 6.8 ps 的再生放大激光输出<sup>[2]</sup>。国内中科院物理所、上海光机所等单位也进行过这方面的初步研究<sup>[3-5]</sup>。利用现有的实验条件, 我们也进行了锁模脉冲再生放大的研究工作。

### 2 实验装置与工作原理

与传统的再生放大系统相比, 本文在光路上进行了改进, 简化了结构, 并通过实验验证了改进的可

行性。再生放大激光系统光路如图 1 所示, 由主振荡器、隔离系统和再生放大器三部分组成。

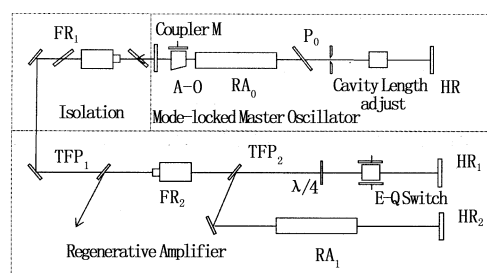


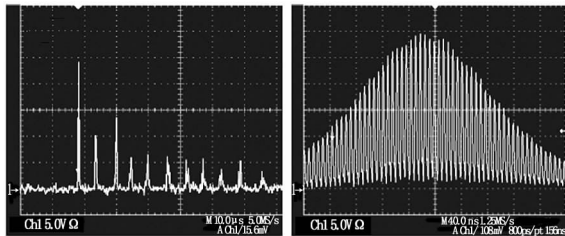
图1 再生放大系统光路图

主振荡器为氙灯侧面抽运 Nd:YAG 工作物质, 采用了声光锁模方式, 光阑大小为 1.7 mm, 腔长为 1.07 m。在工作频率为 20 Hz 时, 氙灯抽运后经声

**作者简介:**秘国江(1973-), 男, 高级工程师, 主要从事高功率固体激光技术方面的研究。E-mail: bi\_gj@163.com

**收稿日期:**2009-02-18

光锁模,主振荡器输出 10 个左右从大到小的脉冲包络序列,如图 2(a)所示。把第一个包络展开,可看到约 120 个子脉冲,子脉冲间隔均为 7.1 ns(相当于重频 140 MHz),如图 2(b)所示。主振荡器输出的脉冲序列经隔离器后,直接注入再生放大器。再生放大器从中选出一个子脉冲,进行再生放大。



(a) 脉冲包络序列 (b) 单包络展开图

图 2 声光锁模主振荡器脉冲包络波形

### 2.1 再生放大器工作原理

再生放大过程主要包括种子脉冲注入再生放大腔、多程放大、腔倒空输出三个过程。由图 1 可以看出,主振荡器输出的脉冲包络没有经过单脉冲选择,整个脉冲包络注入再生放大谐振腔。通过再生放大腔长的控制,脉冲单选功能可被集成到再生放大过程中进行。

要在一串脉冲中单选出一个锁模脉冲进行放大,是通过在特定时刻给普克尔盒加上  $\lambda/4$  电压实现的。当普克尔盒上不加  $\lambda/4$  电压时,子脉冲序列两次经过  $\lambda/4$  波片,产生  $\pi$  的位相差,偏振态旋转  $90^\circ$ ,经偏振片 TFP<sub>2</sub> 进入到放大级 RA<sub>1</sub>。从放大级 RA<sub>1</sub> 返回的皮秒激光脉冲序列经偏振片 TFP<sub>2</sub> 再次进入  $\lambda/4$  波片两次,偏振态旋转  $90^\circ$ ,经 TFP<sub>2</sub>, FR<sub>2</sub> 和偏振片 TFP<sub>1</sub> 输出。而普克尔盒加上  $\lambda/4$  电压之后,进入谐振腔的脉冲序列,两次经普克尔盒和  $\lambda/4$  后,位相变化为  $2\pi$  的整数倍,没有经过放大级 RA<sub>1</sub>,直接经 TFP<sub>2</sub> 输出。只有加高压脉冲瞬间,刚经过普克尔盒两次,和光程上经 HR<sub>2</sub> 反射还没有第三次到普克尔盒的脉冲,才可能在再生放大谐振腔内多程振荡。当皮秒脉冲在增益达到饱和后,把普克尔盒上的高压去掉,主振荡器输出的子脉冲被放大上万倍后输出腔外。在此过程中,待选脉冲前面的子脉冲被放大了两次,但与待选脉冲放大十几次相比,放大脉冲仍具有较高的对比度。

### 2.2 再生放大腔长设计与放大次数

腔长必须根据主振荡器中锁模子脉冲序列的时间间隔来选定。子脉冲在再生放大腔内振荡一圈的时间,要小于子脉冲时间间隔的两倍,否则就有可能两个以上脉冲被再生放大,故腔长的最大值为:

$$L_{\max} = c \times \Delta t$$

其中,  $c$  为光速;  $\Delta t$  为子脉冲时间间隔。考虑到普克

尔盒高压开关的上升沿和下降沿一般也有 4 ns,故腔长实际上要短些。本文所采用的种子源周期  $T=7.1$  ns,则  $L_{\max}=2.1$  m,实验中所选取的实际腔长为 1.23 m。

高压加载时间的长短决定了选出的脉冲被放大的次数,一般都设置为脉冲在腔内振荡周期的整数倍。由于脉冲在腔内振荡一个周期要 2 次经过 Nd:YAG 晶体,则有:

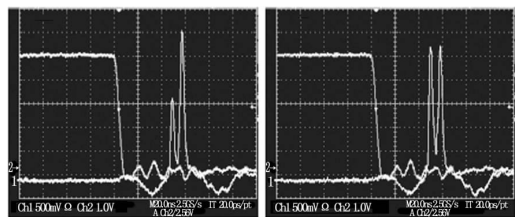
$$\text{放大次数} = 2 \times \frac{\text{高压信号宽度}}{\text{双程时间}}$$

## 3 实验结果分析

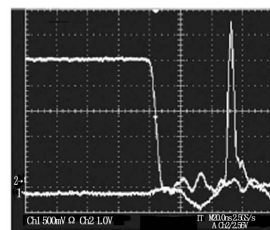
### 3.1 单脉冲再生放大

普克尔盒是再生放大器中的核心光学器件。高压驱动源根据激光脉冲在再生放大腔里的传输情况,通过普克尔盒对激光脉冲进行精确控制,实现子脉冲的单选、多程振荡和腔倒空输出。主振荡器输出的子脉冲序列间隔为 7.1 ns (相当于重频 140 MHz),故激光单脉冲的选择对电路时序和高压驱动源的要求高,加压时刻的控制非常重要,它直接决定能否实现脉冲的单选功能。

为减小高压脉冲信号与子脉冲的抖动,高压脉冲驱动源采用两个触发:先电信号预触发,接着光信号触发,二者协同工作,可获得  $\leq 1$  ns 的高精度时间同步。此外,高压脉冲上升、下降沿小于 5 ns (10% ~ 90%),高压下降沿如图 3(a)中所示。触发到脉冲输出延迟和高压脉冲宽度均可调,精度为 250 ps。高压脉冲与注入脉冲序列不同步时,一个半和正好两个脉冲信号被再生放大后的脉冲时间波形如图 3(a)、图 3(b)所示。当高压脉冲与注入脉冲序列同步时,两者之间的抖动  $\leq 1$  ns,可实现 100% 单脉冲再生放大输出,如图 3(c)所示。



(a) 一个半脉冲被放大图 (b) 两个脉冲被同时放大图



(c) 单脉冲再生放大输出

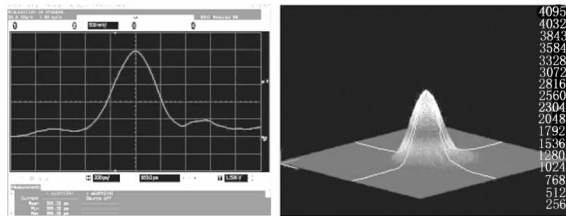
图 3 高压脉冲下降沿与再生放大后的脉冲波形

### 3.2 脉冲宽度

再生放大器输出激光的脉冲宽度主要由锁模主振荡器决定,主振荡器采用声光锁模,输出脉冲较宽为百皮秒量级。示波器和超快光电探头均有上升、下降沿时间,已经不可忽略。一个示波器脉宽测量值  $T_{me}$  包含了实际激光脉冲宽度  $T_{re}$  和示波器、超快光电探头的上升、下降沿时间  $T_{os}, T_{od}$ , 则激光脉冲的实际宽度为:

$$T_{re} = 2 \cdot \left[ \left( \frac{1}{2} T_{me} \right)^2 - T_{os}^2 - T_{od}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

用带宽 12 GHz Aglient 示波器(上升沿时间 36.5 ps)和超快光电探测器 THORLABS SV2 - FC(响应波长 320 ~ 1100 ns, 上升沿时间 120 ps)测量再生放大器输出脉冲宽度为 395 ps, 如图 4(a)所示, 据公式可得实际脉宽为 305 ps。



(a) 脉冲宽度波形 (b) 光斑分布强度

图4 再生放大器输出脉冲波形及光斑分布

### 3.3 脉冲能量及光束质量

图3中, 高压下降沿与再生放大脉冲之间的时间间隔近似为高压脉冲宽度, 即被放大激光脉冲在再生放大腔内振荡的时间。通过改变再生放大高压波形的脉宽, 可以调节再生放大脉冲在谐振腔内的振荡圈数, 以达到最大增益。主振荡器和再生放大级氙灯电压分别为 627 V 和 500 V, 放电电容均为 100  $\mu$ F。20 Hz 氙灯脉冲抽运, 激光脉冲增益要远远大于 LD 连续泵浦方式。图5为在全反镜  $HR_2$  处用光敏探头测的多程放大增益间的关系。到达再生放大器时单个子脉冲的能量为 0.1  $\mu$ J, 子脉冲在再生放大腔中往返 61.6 ns, 7 圈 14 次放大后脉冲能量近饱和, 为 3.2 mJ, 放大倍数  $\geq 3 \times 10^4$ 。

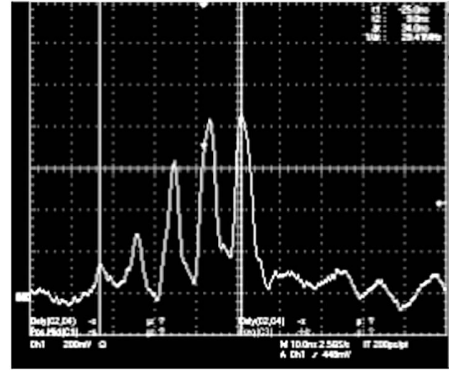


图5 再生放大激光脉冲每程增益间的关系

再生放大器偏振片 TFP<sub>1</sub> 处输出光斑如图 4(b)所示, 为高斯分布, 光斑直径 1.6 mm, 经测量 2.1 m 处光斑大小基本无变化, 可知光束质量近衍射限。

## 4 结论

本文通过控制再生放大腔长, 把脉冲单选开关集成到了再生放大器中, 并通过实验验证了改进的可行性, 可大幅降低再生放大器的成本。并实现了 20 Hz 氙灯抽运再生放大 100% 单脉冲输出, 脉冲能量为  $\geq 3.2$  mJ, 放大倍数  $\geq 3 \times 10^4$ , 输出脉冲宽度为 305 ps, 输出光束质量近衍射限。为下一步千赫兹激光二极管泵浦再生放大器研究工作打下了一定的基础。

## 参考文献:

- [1] J Kleinbauer, R Knappe, R Wallenstein. A powerful diode-pumped laser source for micro-machining with ps pulses in the infrared, the visible and the ultraviolet[J]. Applied Physics B, 2005, 81: 315 - 320.
- [2] J Kleinbauer, R Knappe, R Wallenstein. 13 - W picosecond Nd:GdVO<sub>4</sub> regenerative amplifier with 200 - kHz repetition rate [J]. Applied Physics B, 2005, 81: 163 - 165.
- [3] 陈长水, 汪家升. Cr: LiSAF 再生放大系统[J]. 中国激光, 2003, (10): 890 - 892.
- [4] 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.
- [5] 王春, 陈绍和, 马忠林, 等. 激光二极管阵列抽运的纵模激光脉冲再生放大器[J]. 光学学报, 2001, 21(7): 820 - 824.