

LD 泵浦再生放大器技术研究

王 旭¹, 秘国江^{1,2}, 钟国舜¹, 毛小洁¹

(1. 华北光电技术研究所, 北京 100015; 2. 固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘要:再生放大器作为一种具有极高增益的前置放大器,在获取窄脉宽、高峰值功率激光过程中具有重要作用。本文对再生放大器的传统光路进行了改进,通过光路设计与精确时间控制,将脉冲单选功能集成到再生放大过程中,进行了腔内单选再生放大器技术研究,实验证明这种改进是完全可行的。

关键词:激光技术;再生放大;二极管泵浦;超短脉冲

中图分类号:TN243 **文献标识码:**A

Study on laser diode-pumped regenerative amplifier

WANG Xu¹, BI Guo-jiang^{1,2}, ZHONG Guo-shun¹, MAO Xiao-jie¹

(1. North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China;

2. Science and Technology on Solid-state Laser Laboratory, Beijing 100015, China)

Abstract: As a typical kind of preamplifier with extremely high gain, regenerative amplifier is very important in the field of obtaining ultra-short high-energy laser pulses. In this paper, an improvement on the traditional regenerative amplifier was introduced. The usual pulse picker was taken out, and its function was integrated into the stage of amplifying by the optical configuration design and the precise control of time, and the result of the experiment proved that this kind of improvement was absolutely feasible.

Key words: laser techniques; regenerative amplifier; LD-pumped; ultra-short pulse

1 引言

近年来,高重复频率、高平均功率超短脉冲激光在医疗、材料处理、卫星测距等许多领域得到了广泛应用^[1]。再生放大器作为一种获得高重复频率、高平均功率超短脉冲激光的重要手段,近几年得到了快速发展。2005年,德国 J. Kleinbauer 等人采用 Nd:GdVO₄ 为作为工作物质,实现了重复频率 200 kHz,脉宽 6.8 ps,输出功率 13 W(单脉冲能量为 65 μJ)的再生放大激光输出^[2]。在国内,中国工程物理研究院物理与化学研究所、中科院上海光机所和北京工业大学等单位也对再生放大器技术有过研究^[3-5]。

2 传统的再生放大器

与行波放大器相比,再生放大器即使在较高的重复频率下也能够提供高达 10⁶ 倍以上的小信号增

益,并且引入的时间波形畸变和附加噪声都很小。再生放大器区别于行波放大器的最显著特征是程放大,其放大过程包括种子脉冲注入、程放大和腔倒空输出等三个过程^[6]。在传统再生放大器中,为了获得所需频率的脉冲激光输出,在放大前,通常都会采用一个脉冲单选模块对 MHz 锁模脉冲序列进行单选。图 1 为常见的脉冲单选模块结构示意图。

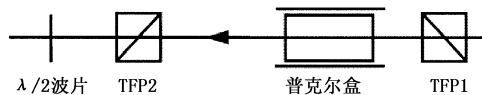


图 1 脉冲单选模块结构示意图

图中两个偏振片 TFP1 和 TFP2 的透振方向相互垂直,普克尔盒不加电压时,种子激光脉冲不能通

作者简介:王 旭(1978-),男,工程师,硕士,从事固体激光技术的研究工作。E-mail:010wangxu@sina.com

收稿日期:2010-04-28;**修订日期:**2010-08-16

过。当普克尔盒加上 $\lambda/2$ 电压时,激光脉冲经过普克尔盒时偏振方向旋转 90° ,脉冲经过 TFP2 透射。当进行脉冲单选时, $\lambda/2$ 电压以一定的频率、一定的时间宽度加到普克尔盒两端,保证高压加载期间只有一个脉冲能经过普克尔盒,这样就可以实现一个 $\lambda/2$ 电压脉冲选取一个锁模激光脉冲。单选后的激光脉冲频率与加载到普克尔盒上 $\lambda/2$ 电压的频率相同。 $\lambda/2$ 波片的作用是防止放大后的激光脉冲进入到锁模种子源中。

这种先单选再放大的传统再生放大技术优点在于,放大脉冲的频率稳定、脉冲对比度相对较高,对后面的再生放大器腔长没有特殊要求,因此整个系统的设计相对简便;缺点在于,由于需要使用脉冲单选模块,这势必牵涉到多个器件的精确时间同步问题,从而增加了系统结构的复杂性、降低了系统的可靠性,同时也增加了系统的成本。

3 腔内单选的再生放大器

理论证明,再生放大器在适当的腔长条件下,锁模激光脉冲的单选功能可以集成到再生放大过程中,即脉冲单选可以放到再生放大腔内来实现。下面以一个具体的再生放大光路来说明腔内单选再生放大技术的实现原理。

图2为一锁模激光脉冲序列示意图,脉冲周期为 T_0 ,一般为纳秒量级。锁模激光脉冲序列中有三个连续的单脉冲:脉冲1、脉冲2、脉冲3。

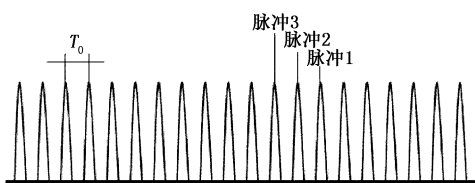


图2 锁模激光脉冲序列示意图

这些脉冲从偏振片 TFP 注入图3所示再生放大器中。HR1,HR2 为再生放大腔的两个端面反射镜。

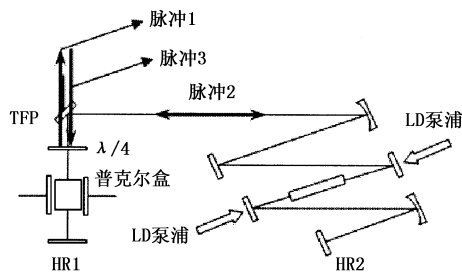


图3 再生放大器光路图

在普克尔盒上不加 $\lambda/4$ 电压的情况下,任意一个锁模激光脉冲注入到再生放大腔内后,由于 $\lambda/4$ 波片的作用,都会在腔内振荡一个周期后从偏振片

TFP 透射输出腔外。由脉冲运行的轨迹分析可知,从脉冲由 TFP 注入到腔内开始,到振荡一个周期后从 TFP 输出腔外为止,光脉冲要4次经过普克尔盒。

假定在某个特定腔长条件下,锁模激光脉冲序列中的3个连续脉冲:脉冲1、脉冲2、脉冲3注入到再生放大腔内之后,可以形成图3中所示的运行状态,即:

(1)脉冲1已经在腔内振荡一个周期,即将或者已经从偏振片 TFP 处输出;

(2)脉冲2正在腔内振荡,并且其脉冲位置处于第二次和第三次经过普克尔盒之间;

(3)脉冲3刚刚由偏振片 TFP 注入到腔内,其脉冲位置还没有到达普克尔盒。

在这个时刻,给普克尔盒加上 $\lambda/4$ 电压,则:

(1)脉冲1不受任何影响,仍然从 TFP 输出腔外;

(2)加了 $\lambda/4$ 电压之后,当脉冲2第3次、第4次经过普克尔盒,其偏振方向将额外旋转 90° ,在运行到 TFP 时将再次被反射到腔内继续振荡。并且只要普克尔盒上 $\lambda/4$ 电压不撤销,振荡的过程就会一直持续下去;

(3)脉冲3由 TFP 注入到腔内之后,根据偏振方向发生变化,经过 HR1 反射后,脉冲在偏振片 TFP 处将直接透射输出腔外,没有振荡的过程。并且只要普克尔盒上 $\lambda/4$ 电压不撤销,脉冲3之后的锁模激光脉冲的运行轨迹都将如此。

经过以上分析可知,在上述特定时刻给普克尔盒加上 $\lambda/4$ 电压之后,将只有一个脉冲被限制在再生放大腔内持续振荡。这样,在普克尔盒上每加载一次 $\lambda/4$ 电压,就会有一个锁模激光脉冲被限制在腔内连续振荡并得到多程放大,放大的次数由 $\lambda/4$ 电压加载的时间宽度决定。只要 $\lambda/4$ 电压不撤销,脉冲就会一直在腔内振荡放大直至饱和。所以,在普克尔盒能响应的频率范围内,通过改变加载到普克尔盒上的 $\lambda/4$ 电压的频率,就可以得到相应频率的单选放大脉冲。

上述理论分析证明,特定条件下,在再生放大的过程中进行脉冲单选是可以实现的。但这种实现原理对再生放大腔的腔长有着特殊的要求,即腔长不能太长,否则将会有多个脉冲被限制在腔内振荡得到多程放大,不能实现单选。腔长最长情况如图3所示,即脉冲1即将输出腔外,脉冲3即将注入腔内,由于脉冲1和脉冲3之间的时间间隔刚好为2

个锁模激光脉冲周期,而脉冲 1 输出之前运行的距离约为腔长的 2 倍,则可近似推导出能实现单选的腔长上限的计算公式:

$$2 \times L_{\max} \approx c \times (2 \times T_0)$$

$$L_{\max} \approx c \times T_0 \quad (1)$$

理论上,腔长越短,越有利于单选功能的实现,但由于电光开关有一定的响应时间,普克尔盒高压驱动源所提供的 $\lambda/4$ 高压也存在一定的上升沿时间,所以腔长也不能太短,其长度必须给待单选的脉冲足够的运行空间,以保证在其第二次和第三次经过普克尔盒的时间内,普克尔盒上的 $\lambda/4$ 高压能够完全加载。

4 实验及结果分析

腔内单选再生放大技术是建立在特殊腔长设计和普克尔盒高压驱动源精确时间控制基础上的:在腔长合适的条件下,要实现脉冲单选,必须精确掌握普克尔盒上的 $\lambda/4$ 高压加载的时刻;在放大过程中,要在脉冲放大到最大时进行腔倒空输出,要求高压驱动源能精确控制 $\lambda/4$ 高压的撤销时刻。图 4 为完整的腔内再生放大实验系统示意图。

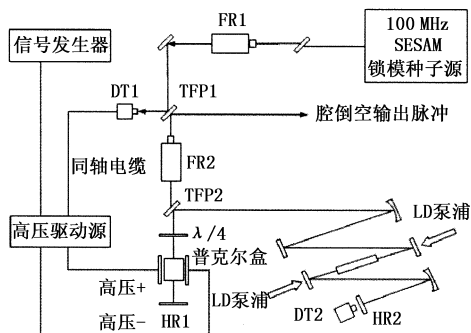


图 4 再生放大实验系统示意图

DT1 和 DT2 为两个灵敏光电探头。其中 DT1 直接接收由偏振片 TFP1 反射的微量锁模种子光脉冲,转化为电信号后提供给高压驱动源作为其时钟频率。由于锁模种子源能够长时间稳定地输出 100 MHz 光脉冲,由其作为时钟源,可以保证高压驱动源对 $\lambda/4$ 高压的精确时间控制。光电探头 DT2 放在再生放大腔的全反镜 HR2 后,接收被放大的种子脉冲在腔内振荡过程中每次经 HR2 反射时漏出的微量光脉冲信号,用以观察脉冲在腔内每振荡一圈能量的变化情况,从而很方便地找到光脉冲能量最大的时刻进行腔倒空输出。

实验中种子源为自行搭建的 100 MHz 的 SESAM 被动锁模激光器,种子脉冲在放大前单脉冲能量约 1 nJ,脉冲周期 $T_0 = 10$ ns。由于采用腔内单选

的再生放大技术方案,根据公式(1),可以求得再生放大腔的最大腔长: $L_{\max} \approx c$ (光速) $\times T_0 \approx 3$ m。综合考虑,实验中将再生放大腔的总腔长定为 1.7 m。

单选脉冲在再生放大腔内振荡的圈数由高压驱动源加在普克尔盒上的 $\lambda/4$ 高压的时间宽度决定。通过改变 $\lambda/4$ 高压加载时间长度,可以改变光脉冲腔内振荡圈数:

$$\text{放大圈数} = \text{高压时间宽度} / \text{光脉冲振荡一圈时间}$$

图 5 为普克尔盒上 $\lambda/4$ 高压设置不同宽度时,由探头 DT2 观察到的单脉冲能量变化的波形。由图 5 可以看出,单选脉冲在再生放大腔内振荡过程中,脉冲能量会逐渐增大,当能量达到最大时如果不及及时进行腔倒空输出,脉冲能量又会逐渐衰减。图 6 为能量放大到最大时的腔倒空输出波形。

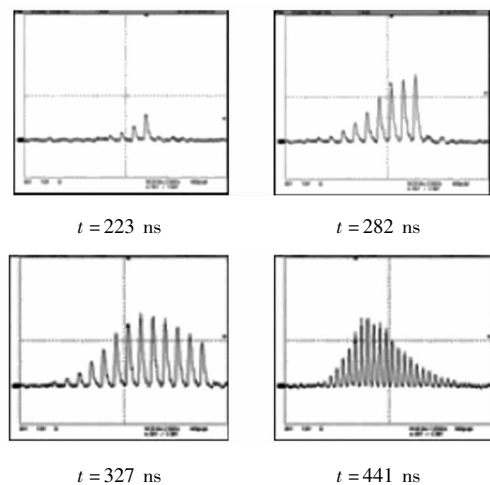


图 5 种子脉冲在腔内振荡不同圈数时脉冲强度变化

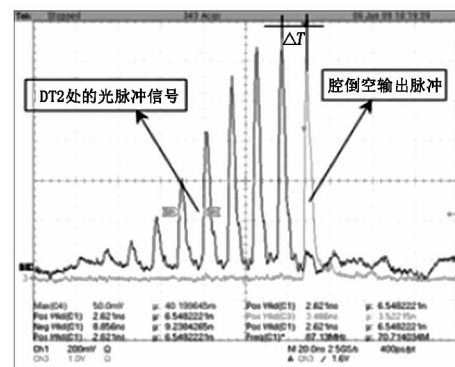


图 6 腔倒空输出的光信号

5 结论

本文对再生放大器的传统光路进行了改进,去掉了独立的脉冲单选模块,通过光路设计和精确的时间控制,将脉冲单选功能集成到了再生放大过程中,进行了腔内单选的再生放大技术研究,通过实验验证了改进的可行性,大幅降低了再生放大器的系统成本。本实验中,在 23 W 泵浦功率条件下,单选

频率为 100 Hz 和 4 kHz 的脉冲序列,经放大后腔倒空输出的单脉冲能量分别达到 2.22 mJ 和 0.495 mJ。根据公式 $\eta = E/E_0$,可知总增益达到了 10^6 。由此可见腔内单选再生放大器作为一种重要的前置放大器,对小信号有着极强的增益。从严格意义上来说腔内单选再生放大技术会使最终输出的单选放大脉冲序列对比度下降。但理论和实验都证明, 10^6 的增益倍数使得这种对比度的下降是完全可以忽略的。

参考文献:

- [1] Chen Chang-shui, Wang Jia-sheng. Cr:LiSAF Regenerative amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, (10): 890 - 892. (in Chinese)
陈长水,汪家升. Cr:LiSAF 再生放大系统[J]. 中国激光, 2003, (10): 890 - 892.
- [2] J Kleinbauer, R Knappe, R Wallenstein. 13-W picosecond Nd:GdVO₄ regenerative amplifier with 200 kHz repetition rate[J]. Applied Physics B, 2005, 81: 163 - 165.
- [3] Li Ming-zhong, Yang Jing-guo. The technology study on laser diode-pumped regenerative amplifier[J]. High Power Laser & Particle Beams, 1999, 11(5): 543 - 546. (in Chinese)
李明中,杨经国,等. 激光二极管泵浦的再生放大器技术研究[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(5): 543 - 546.
- [4] Wei Hui, Zhang Sheng jia, et al. LDA Pumped Nd:YLF regenerative amplifier [J] Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(8): 677 - 680. (in Chinese)
韦辉,张生佳,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] Bingyuan Zhang, Gang Li, et al, Flash-lamp-pumped picosecond Nd:YAG regenerative amplifier Chinese Optics Letters, 2005, 3(12): 692 - 693.
- [6] Bi Guo-jiang, Zhong Guo-shun. Study on flashlamp-pumped mode-locked regenerative amplifier[J] Laser & Infrared, 2009, 39(8): 852 - 854. (in Chinese)
秘国江,钟国舜,等. 氙灯抽运锁模脉冲再生放大器研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(8): 852 - 854.