

钛宝石再生放大器自由振荡特性的 实验研究

吴秋阳 王文耀 杨晓东 张正泉 徐至展

(中国科学院上海光机所强激光光学开放实验室 上海 201800)

提要 报道了自行建立的一台钛宝石再生放大器,它将作为整套 TW 系统的首级放大装置,并通过实验研究了它在自由运转条件下的能量和时间工作特性:获得了 10% 的斜率效率;在 45 mJ 泵浦下得到了 4 mJ 的脉冲激光输出;脉冲建立时间稳定在 350 ns 左右,重复频率为 10 Hz。这些性能指标初步验证了再生放大器的腔结构和光学布置的合理性,其稳定运转保证了将进行的种子注入和放大。

关键词 钛宝石再生放大器,自由振荡,能量与时间特性

对超短激光脉冲的传统放大往往采用有机染料^[1]或者准分子^[2,3]作为放大介质,这些系统虽能提供支持皮秒甚至飞秒脉冲放大所要求的增益带宽,但是由于材料的饱和通量太低,只有 mJ/cm^2 量级,除非采用大口径光束,否则难以将脉冲放大至毫焦量级,但这样又往往使系统变得复杂而昂贵,所以人们现在一般使用诸如钛宝石^[4~6]、钕玻璃^[7,8]、紫翠宝石^[9]和 Cr:LiSAF^[10,11] 等固体激光材料来实现超短脉冲的放大。尤其是钛宝石晶体,由于其饱和通量大($5 \text{ J}/\text{cm}^2$),受激发射谱非常宽(750~1500 nm),而且晶体的机械和热性能俱佳,已成为现代超短脉冲强激光系统的首选放大材料。

由于啁啾脉冲放大技术的提出^[12],国际上已建成多台小型化 TW 级超短脉冲强激光系统^[5~8,11]。而且由于再生放大器本身所具有的结构紧凑、放大倍率高、输出光束质量好等特点,所以经常在 TW 系统中作为第一级放大装置,将振荡器输出的种子脉冲的能量提高到毫焦量级,之后再根据需要作进一步放大。

本文报道了我们最近建立的一台钛宝石再生放大器,它将作为整套 TW 系统的首级放大装置,并研究了其自由振荡时的能量和时间运转特性。

1 再生放大器的光路安排和实验建立

再生放大器是一种利用高速光电元件来进行控制的具有腔结构的激光放大器,它有环形和直线形腔结构两种选择。一般 TW 级 CPA 强激光系统都选用直线型腔结构,这种腔结构简单紧凑,腔内元件少,损耗小,宜于实现小型化,并且容易调节,有利于实现 TEM₀₀ 基横模放大,输出光束质量好。基于上述考虑,我们也选择了具有直线形腔结构的再生放大器,图 1 所示为

再生放大器部分的光路图,同时画出了泵浦光路。泵浦源是 Continuum 公司的 Surelite I-10 型 Nd:YAG 激光器,利用其二倍频的 532 nm 激光输出。

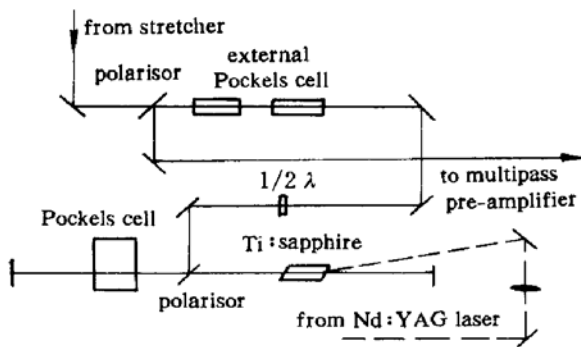


图 1 钛宝石再生放大器及泵浦光路示意图
Fig. 1 The optical layout of the Ti:sapphire regenerative amplifier and the pumping scheme

图 1 中,再生放大器的腔长为 1.2 m,两端腔镜为平面全反镜, $R > 99\%$,全反波段为 750~850 nm,薄型偏振镜 TFP 与光路成布儒斯特角(约 $57\sim 60^\circ$)放置,所镀偏振膜对 S 偏振反射率 $R_s > 95\%$,对 P 偏振透射率 $T_p > 90\%$,为了与提供种子脉冲的钛宝石飞秒振荡器相匹配,偏振膜中心波长选在 815 nm,有效带宽约为 8~10 nm;腔内所使用的钛宝石晶体是由中国科学院上海光机所晶体研究室提供的,晶体尺寸为 $\phi 6 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,掺杂浓度为 0.1 at-%,品质因素 $\text{FOM} > 150$,晶体的两个端面切割成双布儒斯特角;再生

放大器中用于控制种子注入和倒出的普克尔盒及其控制电源为 Medox DR-85A 型,所用非线性晶体是 KDP。精密调节光轴,使其与腔的光轴成适当的角度,在静态未加高压时起到四分之一波片的作用;普克尔盒上的高压脉冲分两步加上:第一步利用 YAG 倍频光泵浦钛宝石作为触发信号,经过一段可调延时 DELAY1 后加上第一个 $1/4$ 波电压使普克尔盒总体上处于半波片状态,使 P 偏振激光在腔内起振;第二步是再经过一段可调延时 DELAY2 后加上一个 $-1/4$ 波电压使普克尔盒退回静态 $1/4$ 波片状态,从而将激光倒出腔外。

通过调节闪光灯的放电电压,所使用的 Surelite I-10 型 Nd:YAG 激光器的 532 nm 倍频光的单脉冲能量可以在 20~200 mJ 范围内调节,脉冲宽度为 7 ns 左右,重复频率为 10 Hz。由于后续的四程放大器也要使用同一泵浦源,所以实际上提供给再生放大器的泵浦能量在 30~50 mJ 之间。利用一个焦距为 750 mm 的平凸透镜将泵浦光聚焦到钛宝石晶体上,由于钛宝石晶体的损伤阈值约为 $4\sim 5 \text{ J/cm}^2$,为保护晶体,实验中将晶体置于焦点前大约 50 mm 处,这样在入射端面上的泵浦光斑直径约为 2 mm,对应能量密度为 $1\sim 2 \text{ J/cm}^2$ 。

2 再生放大器自由振荡特性的实验研究

在引入种子脉冲之前,对再生放大器的能量和时间运转特性作了实验研究和分析。这一方面是因为再生放大器是整套系统中最关键的部分,它的稳定运转对整套系统的正常工作是至关重要的;另一方面是因为自由运转的再生放大器既是一种增益开关型激光器,又是一种使用了腔倒空技术的激光器,其本身的运转特性就有许多有趣和值得研究的地方。

图 2 中的波形是普克尔盒在泵浦光脉冲进入钛宝石晶体之后再经过 $\text{DELAY1} = 65 \text{ ns}$ 的延时,加上第一步 $1/4$ 波电压后腔的输出情况;图 3 是再经过 $\text{DELAY2} = 400 \text{ ns}$ 之后又加上第二步的 $-1/4$ 波电压将普克尔盒退成静态的 $1/4$ 波片状态时所测得的腔内激光波形。延时的长短可以通过将普克尔盒恢复成 0λ 状态(即零波片状态或没有波片存在时的状态)后观测腔的泵浦脉冲和输出脉冲之间的时间间隔(即脉冲建立时间)和输出脉冲的宽度来确定。 DELAY1 应当远小于这一脉冲建立时间,而 $\text{DELAY2} + \text{DELAY1}$ 应该约等于脉冲建立时间与脉宽之和。图 2,3 中最前面的小尖脉冲是泵浦光信号,它同时用于触发普克尔盒控制电源和

示波器;后面的激光脉冲波形不够光滑,有一些等间隔的小起伏,这主要是由于腔内的偏振片表面以及钛宝石晶体的两个布儒斯特表面即使对 P 偏振的激光也存在反射损耗所引起的。仔细分析这种小起伏的数目及分布规律,可以推测出激光脉冲从起振到达到最大值之间一共在腔内来回走了大约 12 程。

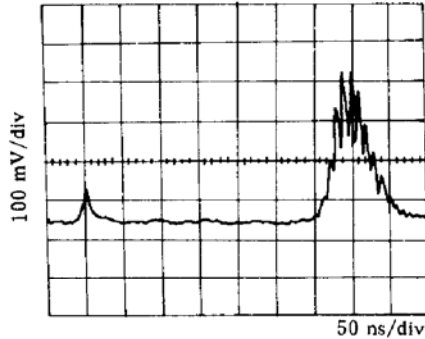


图 2 腔内普克尔盒只加第一步 $1/4$ 波高压时再生放大器的输出情况

Fig. 2 The output of the regenerative amplifier with only the first step of $1/4\lambda$ high voltage being applied to the intra-cavity Pockels cell

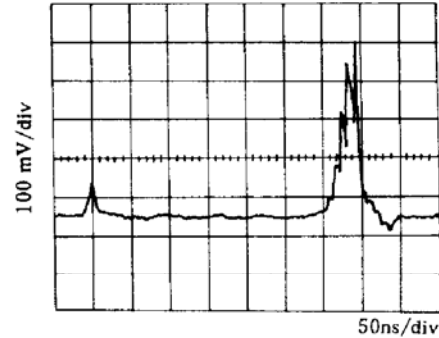


图 3 腔内普克尔盒加上第二步 $-1/4$ 波高压后再生放大器的输出情况

Fig. 3 The output of the regenerative amplifier with the second step of $-1/4\lambda$ high voltage being applied to the intra-cavity Pockels cell

实验中,通过改变泵浦光能量研究了自由运转再生放大器的时间和能量特性,实验曲线绘于图 4 中。由图 4 可见再生放大器在自由运转条件下的斜率效率为 10%;实验中,在保持泵浦能量不变的条件下,让晶体靠近焦点(但一定要保持使晶体不能过于接近甚至处于焦点上),可以获得更高的泵浦效率和更短的脉冲建立时间,这是由于激光的产生主要取决于泵浦的能量密度而不是绝对能量的大小。在泵浦能量一定的条件下,减小光束尺寸,相当于增加了泵浦光能量密度,因而泵浦效率更高,激光脉冲更快地建立起来。但为了保持安全可靠的运转并留一定余量,我们选择将晶体前端面置于焦前约 50 mm 处。从自由运转稳定工作时的情况来看,采用 45 mJ 的能量泵浦时,从晶体另一端面漏出的泵浦能量为 4~5 mJ,同时得到 4 mJ 左右的红外激光输出。这样就能保证在种子光脉冲进入后将其能量放大至毫焦量级。

对于再生放大器自由运转时的频谱特性,只作了简单的实验研究,发现:小范围内($55\sim 60^\circ$)调整偏振镜与光轴的夹角,能起到对输出光波长进行调谐的作用;而且从所镀偏振膜的测试曲线看,能保证中心波长在 815 nm 左右的带宽为 8~10 nm,相应可以支持脉冲宽度为 100 fs 左右的种子激光的放大。在脉冲展宽器建成后,将脉宽为 120 fs 的种子光展宽到 ≈ 200 ps,然后注入再生放大器进行放大,可进一步进行有关再生放大器增益窄化效应的实验研究。

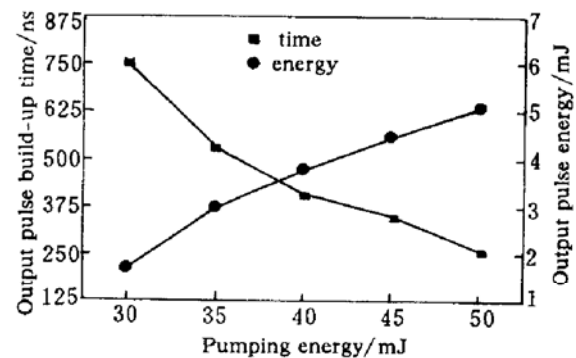


图 4 再生放大器输出脉冲的建立时间和能量与泵浦能量的关系

Fig. 4 The relationship among the build-up time, the energy of the output pulse of the regenerative amplifier and the pumping energy

参 考 文 献

- 1 A. Migus, C. V. Shank, E. P. Ippen *et al.*. Amplification of subpicosecond optical pulses: Theory and experiment. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(1):101~109
- 2 A. P. Schwarzenbach, T. S. Luk, I. A. McIntyre *et al.*. Subpicosecond KrF* excimer-laser source. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(8):499~501
- 3 J. H. Glowina, G. Arjavalingam, P. P. Sorokin *et al.*. Amplification of 350-fs pulses in XeCl excimer gain modules. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(2):79~81
- 4 G. Vaillancourt, T. B. Norris, J. S. Coe *et al.*. Operation of a 1-kHz pulse-pumped Ti:sapphire regenerative amplifier. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(6):317~319
- 5 J. D. Kmetec, J. J. Macklin, J. E. Young. 0.5-TW 125-fs Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(13):1001~1003
- 6 Koichi Yamakawa, Pay H. Chiu, Art Magana *et al.*. Generation of high peak and average power femtosecond pulses at a 10 Hz repetition rate in a titanium-doped sapphire laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(11):2698~2706
- 7 F. G. Patterson, R. Gonzeles, M. D. Perry. Compact 10-TW, 80-fs Nd:glass laser. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(14):1107~1109
- 8 K. Yamakawa, H. Shiraga, Y. Kato *et al.*. Prepulse-free 30-TW, 1-ps Nd:glass laser. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(20):1593~1595
- 9 M. Pessot, J. Squier, G. Mourou *et al.*. Chirped-pulse amplification of 100-fs pulses. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(15):797~799
- 10 M. D. Perry, D. Strickland, T. Ditmire *et al.*. Cr:LiSAF₆ regenerative amplifier. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(8):604~606
- 11 Paul A. Beaud, Martin Richardson, Edward J. Miesak. Multi-terawatt femtosecond Cr:LiSAF laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(2):317~325
- 12 D. Strickland, G. Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses. *Opt. Commun.*, 1985, **56**(3):219~221

Experimental Investigation of the Performance of a Free-running Ti:sapphire Regenerative Amplifier

Wu Qiuyang Wang Wenyao Yang Xiaodong Zhang Zhengquan Xu Zhizhan

(Lab. of High Intensity Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract A Ti:sapphire regenerative amplifier developed recently as a key part of the whole on-developing table-top TW laser system is reported. Experimentally, its energy and temporal performance under the condition of free-running is investigated; the slope efficiency of 10% and the output pulse energy as high as 4 mJ are achieved under a pumping energy of 45 mJ; The build-up time of the output laser pulse is steadily 350 ns and its repetition rate is 10 Hz. From these indexes it shows that the cavity structure and the optical setup of the regenerative amplifier are good and its steady operation makes the injection and amplification of the seed pulse reliable.

Key words Ti:sapphire regenerative amplifier, free-running, characteristics of energy and time