

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*

于连君 程光华 王屹山 陈国夫 赵卫

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

摘要 通过优化放大腔结构参数和采用高光束质量的泵浦激光, 依靠放大器腔内各个元件的色散展宽种子脉冲, 用钛宝石作为增益介质, 在低泵浦能量下, 实现了高光束质量, 高稳定的中等能量的高重复率飞秒脉冲再生放大. 将钛宝石晶体离焦放置, 有效的避免了光学损伤. 在 1.1 mJ 的绿光泵浦下, 获得了 2 ps, 120 μJ, 重复频率为 1 KHz, 光谱带宽 7.8 nm 的放大脉冲, 用石英棱镜对压缩可得到 130 fs 的激光脉冲.

关键词 再生放大; 钛宝石; 展宽器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

0 引言

超短激光脉冲技术的不断发展和成熟使人们能够探索在极短时间发生的瞬态过程, 在物理、化学、生物、医学等领域有着重要的应用价值. 尤其是脉冲宽度在 100 fs 附近、单脉冲能量在微焦级的高重复率飞秒啁啾脉冲再生放大器在激光超精细加工、三维光存储、激光医学等方面有着非常重要的经济价值^[1,2]. 这类应用需要高稳定性、中等能量的飞秒激光光源, 而飞秒激光振荡器输出的典型脉冲能量在 10 nJ, 不能达到这种应用的要求. 虽然一级再生放大或多通放大的飞秒脉冲能量可以达到 mJ 级, 但由于包括展宽器、放大器、压缩器等器件, 整个系统体积较大. 结构紧凑、体积小、稳定性高的飞秒激光放大器受到越来越多的关注.

在传统的高重复率钛宝石啁啾脉冲再生放大器中, 都采用飞秒振荡器、展宽器、放大器、压缩器的结构以避免光学损伤. 这也导致了这类激光器体积庞大、难以维护的缺点. 我们采用了无展宽器的放大器, 在低功率泵浦下, 得到了高效率的放大输出; 通过改用长焦距的凹面镜对和将放大器中的激光晶体离焦放置的办法有效的克服了光学损伤; 整个系统结构紧凑, 输出能量稳定, 光束质量好.

1 实验装置

系统装置如图 1 所示, 1 为聚焦镜, 2、4 为凹面镜对, 3 为钛宝石晶体, 7 为两个为薄膜偏振片, 9、11 为分束镜, 10 为半波片. 用焦距 160 mm 的聚焦

透镜聚焦 1 kHz 重复频率的 YLF 调 Q 倍频光 (Photonic Inc USA) 泵浦再生放大器中的钛宝石晶体. 曲率半径 250 mm 的凹面镜对、6 mm 长的钛宝石晶体、3 个反射镜 5、6、8 组成一个 M 型再生腔. 钛宝石晶体距离凹面镜 2 约 110 mm, 距离凹面镜 4 约 140 mm, 离焦位置使晶体内的峰值功率密度下降, 以防止光学损伤. 一个设置在 0 级 1/4 波片和 1/2 波片相互转换的普克耳盒 (Medox 700 KDP, USA) 和两片宽带薄膜偏振片来控制种子光的注入、放大和倒出, 镜 11 对 800 nm 90% 反射, 1.1 W 绿光泵浦时, 输出平均功率为 100 mW, 脉宽约 2 ps. 由于脉宽展宽量小, 因此, 选用了结构简单、效率高的腔外两棱镜对做为压缩器, 输出脉宽小于 150 fs, 稳定性优于 4%. 并将所有元件包括放大器泵浦源和普克耳盒集成在一个小平台上.

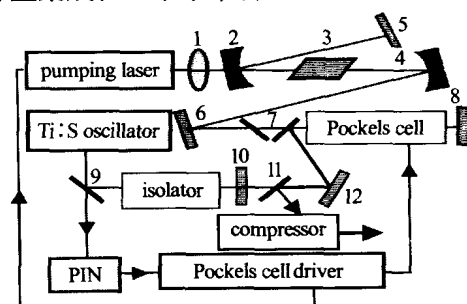


图 1 无展宽器的钛宝石再生放大器示意图
Fig. 1 Schematic of the regenerative amplifier

2 实验结果

一个 70 fs、80 MHz、输出功率 0.9 W 的钛宝石振荡器 (MaiTai RS232 Spectrum-Physics) 做为再生放大器的种子光, 通过光学隔离器和半波片后, 直接注入再生腔中被放大. 由于没有展宽器, 避免了使用展宽器如光栅、空心光纤带来的像差, 能够有效的提高放大器输出的光束质量. 同时, 也避免了普通展宽器带

*国家自然科学基金 (No: No. 60078004) 和国家 863 科学基金 (No: 青 2000-10) 资助项目
Tel: 029-8484268 Email: yulj@opt.ac.cn
收稿日期: 2003-03-04

来的严重的色差,用结构简单、损耗小的棱镜对就可以把放大脉冲压缩到衍射极限输出. 没有展宽器,还可以节省空间,有利于器件的集成化和小型化.

既然没有展宽器,光学损伤就是要解决的首要问题. 种子光通过隔离器以及腔内各个元件后,会引入一定量的色散,使脉冲展宽. 6 mm 长的钛宝石晶体的色散量为 360 fs^2 , 12 mm 长的 $\text{KD}^* \text{P}$ 晶体会引入 53000 fs^2 的色散量, 5 个腔镜有 1500 fs^2 的色散量. 种子光第一次达到钛宝石晶体后,将被展宽到 1.8 ps. 脉冲继续在腔内繁衍时,脉宽变化很小; 1.8 ps 的脉冲在腔内振荡 8 次后,脉冲宽度变为 2.13 ps,趋向稳定. 在 250 mm 的共焦腔中,束腰为 $178 \mu\text{m}$. 一个 $200 \mu\text{J}$ 、 200 fs 的脉冲聚焦到钛宝石晶体上的峰值功率密度为 $4 \times 10^9 \text{ W}/\text{cm}^2$,远低于钛宝石晶体的单脉冲损伤阈值(对 100 fs 的脉冲,损伤阈值的峰值功率密度为 $10^{14} \text{ W}/\text{cm}^2$). 根据这个计算,未展宽的种子光被放大后,不会导致钛宝石晶体的损伤.

实际上,钛宝石晶体的非线性系数比较大,脉冲在晶体内部通过时,会产生严重的自聚焦;而且,纳秒的泵浦光也聚焦到钛宝石晶体上,使得晶体的损伤阈值急剧下降. 在实验过程中,但泵浦光的功率超过 2 W 时,种子光一旦被注入,钛宝石晶体立刻被损伤;即使在 1 W 的泵浦功率,腔倒空输出的平均功率 110 mW,长时间的运行(一周左右)钛宝石晶体也会发生损伤. 为了减小钛宝石晶体内的光强,我们将晶体离焦放置,距凹面镜(2) 115 mm,距凹面镜(4) 135 mm. 为了保证相当的泵浦效率,泵浦光的焦点仍然聚焦到钛宝石晶体上,在 1.1 W 泵浦时,输出功率 100 mW,单脉冲能量 $100 \mu\text{J}$. 完全可以满足微加工的应用.

再生放大腔的阈值只有 0.4 W,钛宝石晶体离焦放置,在 1.1 W 的低泵浦功率效率达到了 9.1%,斜效率达到 14.3%. 和我们过去的再生放大器相比,效率提高了很多,这主要归功于高光束质量的泵浦源. 用作泵浦源的绿光是半导体泵浦的调-Q YLF 倍频光,TEM00 模输出,脉冲宽度为 35 ns,光束的发散角效率 0.4 mrad. 没有普克耳盒时,加 10% 的反射镜,再生腔的斜效率超过 30%.

种子光是波长可以从 750 ~ 850 nm 调谐,脉冲宽度效率 70 fs,重复率 80 MHz,输出功率大于 800 mW 的自锁模钛宝石振荡器. 一个光电探测器用来收集透过镜 9 的种子光,转换为点信号来驱动普克耳盒驱动器. 驱动器将 80 MHz 分为 1000 Hz,输出 3 路同步 TTL 信号,一路驱动 YLF 调 Q 盒;一路驱动普克耳盒的 1/4 电压;最后一路驱动普克耳盒的 1/2 电压,延迟线之间有紧密的延迟控制. 在 1.1 W 泵

浦时,输出 $100 \mu\text{J}$ 的 ps 脉冲,光谱带宽 7.7 nm,用石英棱镜压缩可以压缩到 130 fs. 图 2 是钛宝石放大器输出的光谱;图 3 是用二次自相关仪测量出的自相关迹径,显示脉冲宽度为 200 fs;图 4 是放大脉冲的光强分布,光滑曲线是高斯拟合曲线,右上角是光斑的强度外形.

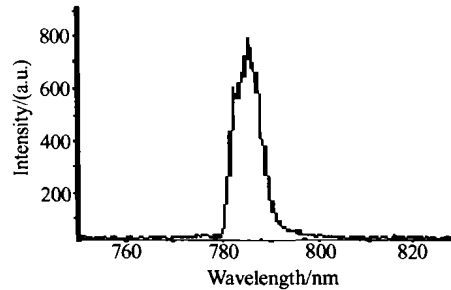


图 2 钛宝石放大器输出光谱特性
Fig. 2 The spectrum of Ti:S CPA amplifier

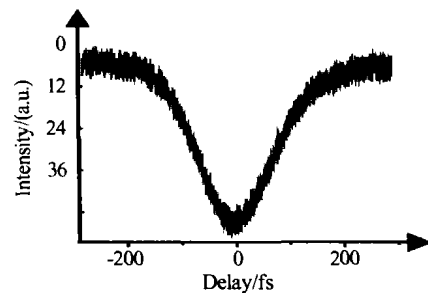


图 3 放大器输出的脉宽的强度自相关迹径
Fig. 3 Intensity autocorrelation trace of Ti:S CPA amplifier

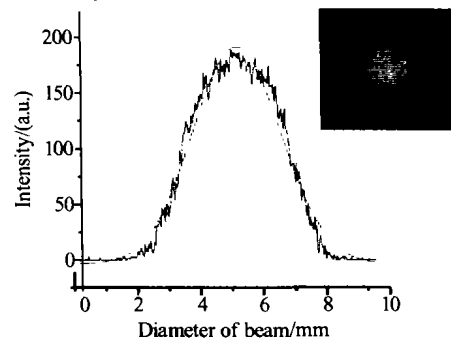


图 4 放大器输出的光斑及强度分布曲线
Fig. 4 Intensity distribution of the amplifier beam along diameter and the inset is the laser beam taken by digital camera

3 放大器的调谐

为了测试种子光波长对放大脉冲特性的影响,我们改变种子光的波长,在腔内没有加双折射滤光片时,放大器的输出波长和功率没有任何改变. 这是由于钛宝石晶体的增益峰在 795 nm 处,虽然所用反射镜的膜都是从 750 ~ 850 nm 全反,模式竞争使得增益最大的波长形成激光振荡,偏离增益峰的波长难以起振. 要实现调谐就必须用波长选择元件压缩这种自然倾向,强制激光在某些波长运行.

在腔内加入一片 0.5 mm 厚的单晶石英片,可以实现 30 nm 的调谐范围,这种薄的双折射滤光片不会导致光谱变窄,反而能平坦中心增益,使光谱变

宽^[4]. 调谐曲线和输出能量的关系如图 5 所示.

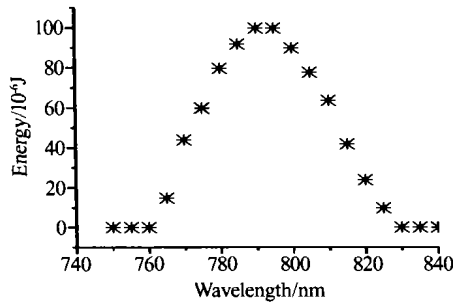


图 5 放大器的调谐曲线

Fig. 5 The tuning curve of regenerative amplifier with 0.5 mm-thickness Quartz plate

4 稳定性

再生放大器的稳定性是应用时考虑的最主要因素之一,微加工对其要求更高. 和稳定性相关的因素很多,除了机械稳定性外,种子脉冲,泵浦源的稳定性,腔内的色散补偿,自相位调制,和增益窄化等都与稳定性有关. 由于再生放大器在增益饱和区域,不稳定因素主要来源与 p 偏振态和 s 偏振态的竞争引起的^[5]. 因此我们主要是从提高偏振度的角度来提高放大器的稳定性. 在再生腔内,能起到偏振选择作用的除了布氏角切割的晶体以外,主要是薄膜偏振片,而薄膜偏振片对 s 偏振光只有 90% 的反射率,为了抑制 s 偏振光在腔内振荡,我们插入了另一块薄膜偏振片,如图 1 所示. 放大器的稳定性由 8% 提高到 3%.

Without Stretcher, Compacted, and High Beam Quality, High repetition rate Ti:sapphire Femtosecond Pulse Amplifier

Yu Lianjun, Cheng Guanghua, Wang Yishan, Chen Guofu, Zhao Wei

State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068 China

Received date: 2003-03-04

Abstract The design of a without stretcher and compacted femtosecond Ti:sapphire chirped regenerative amplifier is described. The broadening of seed pulse comes from the dispersion of elements in regenerative cavity. It sustains amplification over a wavelength range from 775 nm to more than 810 nm with a birefringent filter and an oscillation bandwidth of 7.7 nm, and produces 2.1 ps chirped output pulse energy of 120 μ J at 2.1 mJ pumping power. Two thin-film polarizers improve the stability of amplifier, and off-focusing Ti:sapphire crystal avoids the optical damage. Good beam quality and high stability make it an ideal source for femtosecond laser micro-machining.

Keywords Regenerative amplifier; Ti:Sapphire laser; Stretcher



Yu Lianjun was born in 1974, graduated from Xi'an Jiaotong University in 1998. Now he is currently working as a Ph. D. candidate at the State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science. His research interests are nonlinear optics, ultrashort pulse generation, laser material processing, and three dimension optical data storage.

5 结论

采用无展宽器的飞秒放大系统,避免了展宽器引入的像散和空间色散保证了光束的质量,并采用放大介质离焦的方法降低放大脉冲的功率密度,从而减少了对增益介质的损伤和非线性效应,是可以得到中等能量的飞秒放大脉冲. 其次,再生放大器的稳定性可以通过提高偏振度,减小模式竞争,得到有效的改善.

参考文献

- 1 Kawamura K, Sarukura N, Hirano, *et al.* Periodic nanostructure in crossed holographic gratings on silica glass by two interfered infrared-femtosecond laser pulses. *Appl Phys Lett*, 2001, **79**(9):1228 ~ 1230
- 2 Glezer E N, Mazur E. Ultrafast-laser driven micro-explosions in transparent materials. *Appl Phys Lett*, 1997, **71**(4):882 ~ 884
- 3 French P M W. The generation of ultrashort laser pulses. *Rep Prog Phys*, 1995, **58**, 169
- 4 程光华,刘青,杨玲珍,等. 飞秒激光脉冲诱导透明介质的非线性吸收和折射率改变轮廓研究. *光子学报*, 2003, **32**(11):1281 ~ 1285
Cheng G H, Liu Q, Yang L Z, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11):1281 ~ 1285
- 5 Nelson T R, Schroeder W A, Rhodes C K, *et al.* Short-pulse amplification at 745 nm in Ti:sapphire with a continuously tunable regenerative amplifier. *Appl Opt*, 1997, **36**, 7752