

全固态 kHz 啁啾脉冲飞秒激光放大器^{*}

王兆华, 魏志义, 王 鹏, 令维军, 田金荣, 张 杰

(中国科学院 物理研究所, 北京 100080)

摘 要: 要建造大功率超强激光系统, 必须将 nJ 量级的种子进行放大, 以得到 mJ 量级以及更高能量的激光输出。为达到这个目的, 必须使种子能量指数增加, 再生腔放大器是实现这一目的的良好途径; 同时, 为了得到更稳定的激光输出, 须采用高重复频率的泵浦源。为此, 设计了一种 kHz 重复频率激光泵浦的再生放大器, 使用 15 mJ 的 527 nm 的绿光泵浦, 得到了约 2.3 mJ 的 800 nm 放大激光输出, 同时, 对其输出激光的光谱特性进行了测量, 将带宽为 40 nm 的种子注入后, 得到了光谱带宽约为 30 nm 激光输出。

关键词: 飞秒激光; CPA 技术; 再生腔放大技术

中图分类号: O437

文献标识码: A

随着啁啾脉冲放大(CPA)技术的发展, 放大后的激光脉冲能量从几十 μJ 到几百 J, 脉冲峰值功率也从几十 GW 发展到 PW, 放大器的重复频率也由几 kHz 变化到 0.1 mHz。在这些各种各样的放大器中, 通常采用一级预放大和几级主放大的方案, 有的甚至只采用一级主放大的方法。预放大过程是将一个 nJ 量级的激光脉冲放大到 mJ 量级, 在这个过程中, 脉冲的能量指数递增, 迅速得到放大; 主放大过程是一个线性放大过程, 通常采用多次放大的方式, 随着泵浦能量的增加, 激光脉冲能量线性增加。激光脉冲能否有效地放大, 很大程度上取决于预放大过程, 因此人们对预放大技术做了很多的研究工作。通常来说, 预放大技术可以归结为两类: 一是多通预放大技术, 另一种是再生放大技术。多通预放大技术是采用多次通过的方法将种子脉冲放大, 由于放大过程中, 种子通过晶体的次数较少, 所以引入的材料色散较小, 有利于脉冲的压缩; 然而它对种子的空间模式分布要求较高, 放大后的空间光束质量较差。再生腔放大技术是将种子注入到一个自由运转的激光腔中, 使种子与原有激光耦合, 在腔内经过多次振荡得到放大; 在这一过程中, 由于种子在晶体中通过了很多次(20~30次), 引入了较大的材料色散; 但是它输出的光束具有很好的空间质量, 对种子的空间质量要求较低, 而且易于操作。我们对再生腔放大技术进行了一些研究, 设计了一种再生腔放大器, 使用 kHz 的 527 nm 绿光作为泵浦源, 使用约 15 mJ 的泵浦能量时, 得到了大约 2.3 mJ 的 800 nm 的宽带放大激光输出, 本文将详细介绍一些这方面的工作。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示, 1, 2, 3 均为 527 nm 的 45° 全反射镜; 4 为焦距为 500 mm 的聚焦透镜, 双面镀 527 nm 高损伤阈值增透膜; 5 为曲率半径为 1 m 的凹面反射镜, 对 700~900 nm, 0° 高反; 6 为对 700~900 nm, 0°

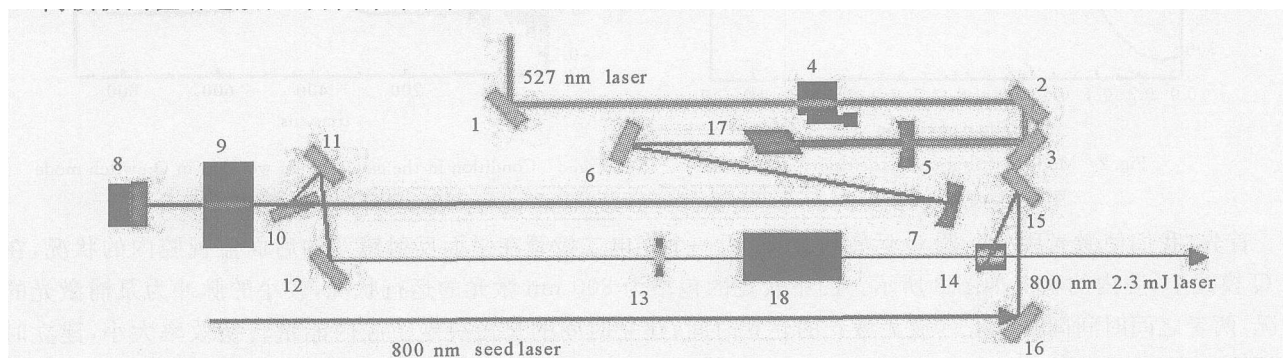


Fig. 1 Experimental setup of regenerative amplifier

图 1 kHz 再生腔放大器实验装置图

^{*} 收稿日期: 2004 11 22; 修订日期: 2005 03 15

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(60225005, 60308001); 中国科学院知识创新工程方向性项目和仪器研制项目资助课题
作者简介: 王兆华(1977—), 男, 山东兖州人, 博士研究生, 从事于飞秒激光诊断测试技术研究。

反射的平面反射镜; 7 为曲率半径为 2 m 的凹面反射镜, 对 700 ~ 900 nm, 0° 高反; 8 为对 700 ~ 900 nm, 0° 反射的平面反射镜; 9 为普克尔盒, 电光晶体的口径为 $\phi 10$ mm, 双面镀有对 700 ~ 900 nm 的宽带增透膜; 10 为薄膜偏振片, 对 700 ~ 900 nm、P 偏振激光高透, S 偏振激光高反; 11 为对 700 ~ 900 nm, 0° 反射的平面反射镜; 12 为对 700 ~ 900 nm 的 45° 反射的平面反射镜; 13 为中心波长为 800 nm 的宽带半波片; 14 为格兰棱镜, 镀有 700 ~ 900 nm 宽带增透膜; 15 为对 700 ~ 900 nm, 0° 反射的平面反射镜; 16 为对 700 ~ 900 nm, 45° 反射的平面反射镜; 17 为 4 mm×4 mm×15 mm 的钛宝石晶体; 18 为法拉第隔离器。

在实验中, 527 nm 的泵浦激光经过聚焦透镜 4 和平面反射镜 1, 2 以及 3 聚焦到钛宝石晶体上; 由凹面镜 5, 7 和平面反射镜 8 以及钛宝石晶体组成激光谐振腔, 为了缩短谐振腔所占的空间尺寸, 使用平面反射镜 6 将谐振腔进行折叠, 首先让激光腔工作在连续运转模式, 调节腔内的各个元件和泵浦光的位置以及焦斑大小, 使激光腔处于最佳工作状态; 然后在腔内安置普克尔盒和薄膜偏振片, 使激光腔处于调 Q 运转状态, 激光在腔内振荡时工作在 P 偏振, 当改变普克尔盒上的电压时, 激光就会转变为 S 偏振, 从而被薄膜偏振片反射到腔外, 由平面反射镜 11 和 12 反射, 使其通过半波片 13 和法拉第隔离器 18, 调节半波片使输出激光由 S 偏振旋转为 P 偏振, 由格兰棱镜透射输出; 最后调节种子激光, 使其由平面反射镜 15 和 16 反射到格兰棱镜 14 上, 经过格兰棱镜反射使其与调 Q 输出的激光完全同轴, 由于法拉第隔离器旋光效应的不可逆性, 当种子激光通过法拉第隔离器和半波片时, 偏振方向不改变, 仍然保持 S 偏振, 这样种子经过平面反射镜 11 和 12 就可以通过薄膜偏振片将其耦合到激光腔中。

2 实验结果

我们根据 ABCD 定律计算该激光腔内的光斑模式分布, 计算结果如图 2 所示。根据图中的结果, 我们可以看出, 如果要避免腔内一些元器件(如普克尔盒内的电光晶体、薄膜偏振片等)的损伤, 则应把它们安装在腔内激光模式比较大的位置上; 如果要得到更大的能量输出, 就要增大晶体内的模式体积, 因此要将其安装在具有大模式的位置上, 然而, 大的模式体积需要更高的泵浦能量, 为了避免晶体的损伤, 此时的泵浦激光不能采用紧聚焦, 这就降低了腔内的能量转换效率; 为了得到较高的转换效率必须将晶体置于模式比较小的位置上。在我们的实验中, 由于采用 kHz 激光泵浦, 泵浦光能量有限, 而且脉冲宽度较长, 不会造成晶体的损伤, 因此将晶体安装在腔内激光模式最小的位置上。

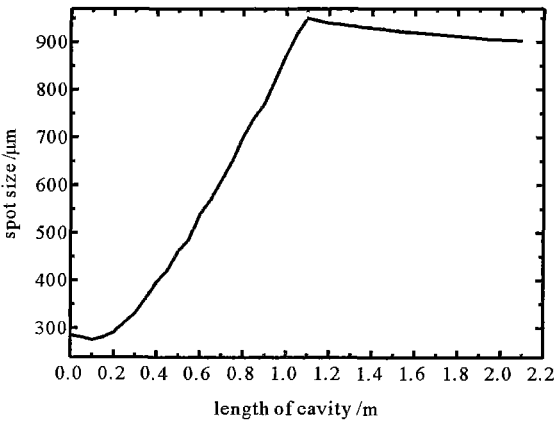


Fig. 2 Mode distribution in the cavity
图 2 腔内模式分布

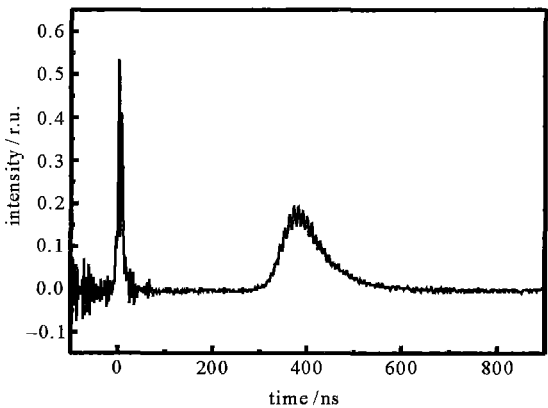


Fig. 3 Condition in the cavity when working in Q-switch mode
图 3 调 Q 模式下, 腔内的状况

首先, 我们使激光腔处于调 Q 运转模式, 使用一个光电二极管在平面反射镜 8 的后面监视腔内的状况, 在调 Q 模式下, 腔内的状况如图 3 所示。图中较宽的包络为 800 nm 激光的运行状况, 较小的脉冲为泵浦激光的状况, 两者之间时间间隔为腔内放大激光的建立时间, 建立时间的长短决定了腔内能量转换效率大小, 建立时间越短, 腔内的能量转换效率就越大; 我们调节泵浦激光的平面反射镜 2 和 3, 使泵浦激光与放大激光耦合得更好, 调节聚焦透镜位置, 使泵浦激光在晶体内部的光斑尺寸更小, 使腔内放大激光的建立时间减到最小。

调节完激光腔的调 Q 运转模式后, 就可以将种子注入到腔内。由振荡器直接输出的种子的脉冲宽度为 20 fs 左右, 经展宽器展宽后脉冲宽度可以达到 300 ps。由于展宽后的种子先要经过一块声光调制晶体, 其偏振方向由 P 偏振旋转为 S 偏振, 然后让其通过格兰棱镜、法拉第隔离器和半波片。旋转半波片, 使种子通过隔离器和半波片后, 偏振方向不发生改变, 仍然为 S 偏振。通过薄膜偏振片的反射, 使种子进入到激光腔内, 当其通过

普克尔盒后, 普克尔盒的驱动器会在电光晶体上施加四分之一电压, 当种子再次通过普克尔盒时, 就会旋转偏振方向, 由 S 偏振旋转为 P 偏振, 这样种子就被捕捉在了腔内。由于普克尔盒上始终保持着一定的电压, 种子的偏振方向就不发生改变, 在腔内往复振荡实现放大。种子注入后, 腔内的情况如图 4 所示, 图中小脉冲的数目代表了种子在腔内振荡的次数, 每振荡一次, 种子就得到一次放大, 当种子在腔内振荡 30 次左右时就达到了饱和增益, 此时改变普克尔盒上的电压, 使种子的偏振方向发生改变, 由 P 偏振旋转为 S 偏振, 种子就会从薄膜偏振片上反射出腔外。种子由腔内倒空后, 腔内的状况如图 5 所示。

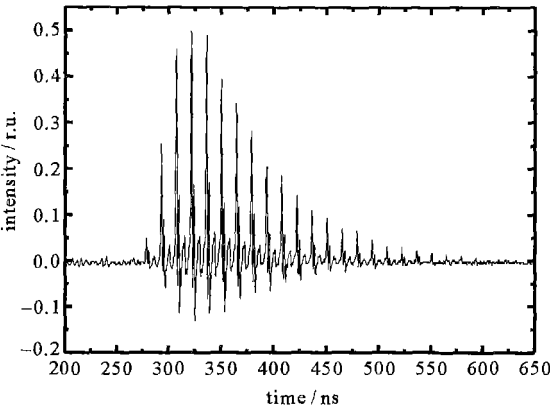


Fig. 4 Condition in cavity when seed injected into cavity
图 4 种子注入后腔内的情况

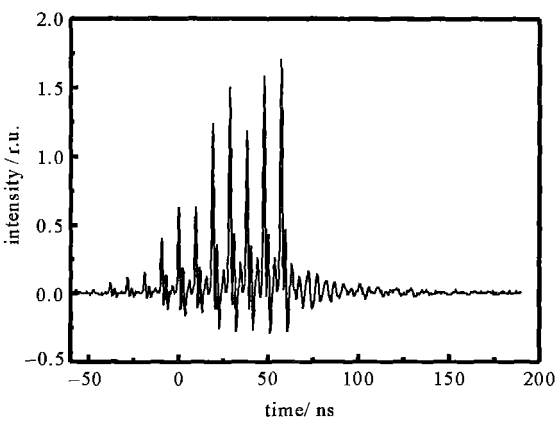


Fig. 5 Condition in cavity when seed ejected from cavity
图 5 种子倒空后, 腔内的状况

对于放大系统来说, 要选择一个适当的种子进行放大, 避免出现多个种子的情况, 因此要严格监视从放大器冲输出脉冲的情况; 种子倒空后, 使用一个光电二极管探测输出激光的情况; 图 6 为监视到的单个放大脉冲。

在 CPA 技术中, 得到窄的脉冲宽度是一个十分重要的研究内容。要得到窄的脉冲宽度, 除了要求种子必须具有宽的光谱以外, 放大系统还必须能够支持足够宽的光谱带宽。为此, 我们对该放大器的光谱响应进行了分析。图 7 为种子脉冲的光谱曲线; 从图中可以看出, 种子脉冲的中心波长约在 790 nm, 光谱带宽约有 40 nm。将种子注入再生放大器前后, 对其输出的激光脉冲的光谱进行了测量, 结果见图 8, 表明没有种子注入时, 放大器输出脉冲的中心波长约在 780 nm, 光谱带宽约在 30 nm; 种子注入后, 受种子脉冲的影响, 腔内的光谱发生了移动, 中心波长移动到了 790 nm 左右, 光谱带宽仍然为 30 nm 左右。这样的光谱带宽在最后的压缩过程中, 可以支持脉冲宽度约为 30 fs 的压缩脉冲。

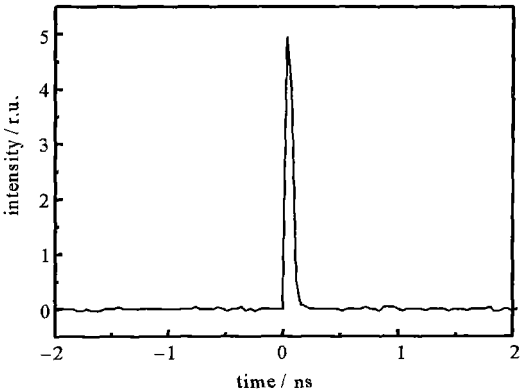


Fig. 6 Amplified laser pulse shown on oscilloscope
图 6 在示波器上观察到的单个放大脉冲

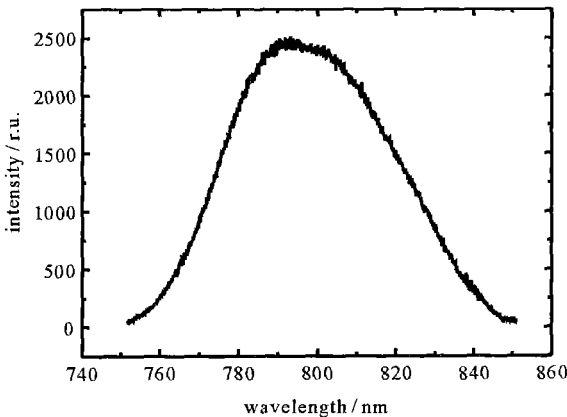


Fig. 7 Spectrum of seed
图 7 种子的光谱曲线

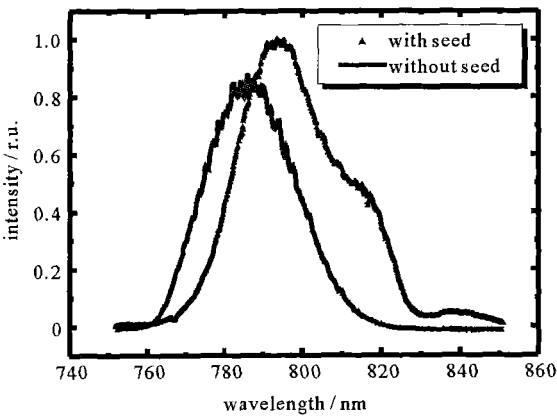


Fig. 8 Spectrum of output laser
图 8 输出激光脉冲的光谱

3 总 结

再生腔放大技术是实现超强激光脉冲放大的重要环节,在 CPA 技术发展中,起着举足轻重的作用,根据实验室发展的实际需要,对再生腔放大技术进行了研究,并且设计了一种 kHz 啁啾脉冲飞秒再生腔放大器,采用紧聚焦结构,在使用 15 mJ 的泵浦能量时,得到了约 2.3 mJ 的 800 nm 的放大激光输出。

参考文献:

[1] Wei Z Y, Zhang J. Highly efficient T W multipass Ti: sapphire laser system[J] . *Science In China*, 2000, **43**(10): 1083—1087.

[2] Rudd J V, Korn G, Mourou G, et al. Chirped pulse amplification of 55 fs pulses at a 1 kHz repetition rate in a Ti: Al₂O₃ regenerative amplifier[J] . *Opt Lett*, 1993, **18**(23): 2044—2046.

[3] Raybaut P, Druon F, Balembois F, et al. Directly diode pumped Yb³⁺:SrY₄(SiO₄)₃O regenerative amplifier[J] . *Opt Lett*, 2003, **28**(22): 2195—2197.

[4] Vaillancourt G, Norris T B, Moutou G A, et al. Operation of a 1 kHz pulse pumped Ti: sapphire regenerative amplifier[J] . *Opt Lett*, 1990, **15**(6): 317—319.

[5] Xia J F, Wei Z Y, Zhang J, et al. Demonstration of high conversion efficiency to second harmonic in a wide tuning range[J] . *Optics and Laser Technology*, 2000, **32**: 241—244.

[6] Barty C P J, Korn G, Raksi F, et al. Regenerative pulse shaping and amplification of ultrabroadband optical pulses[J] . *Opt Lett*, 1996, **21**(3): 219—221.

[7] Koechner W. Solid state laser engineering[M] . Berlin: Heidelberg, 1996.

[8] Yanovsky V, Felix C, Mourou G, et al. Why ring regenerative amplification (regen)[J] . *Appl Phys B*, 2002, **74**(S0): 181—183.

kHz pulse pumped Ti: sapphire regenerative amplifier

WANG Zhao hua WEI Zhi yi WANG Peng, LING Wei jun, TIAN Jin rong, ZHANG Jie

(*Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract: In order to get ultra short intensity laser pulses, it is necessary to amplify the laser pulses from nJ level to mJ level. The regen amplifier is the best way to get high energy laser pulse. It can amplify the seed from nJ level to mJ level quickly. And the output laser has a good spatial mode. A Ti: sapphire regenerative amplifier was designed in this paper. Otherwise, in order to make the output laser stable, a 1 kHz 527 nm green laser was used as the pump laser in the experiment. Using such a Ti: sapphire regenerative amplifier, a 12 nJ seed which was generated from a self mode locking Ti: sapphire oscillator was amplified to energy of 2.3 mJ in a pulse at 1 kHz. The spectrum of the amplifier was also measured. When the 40 nm seed was injected into the cavity, a laser output of about 30 nm was obtained.

Key words: Femtosecond laser; CPA; Regenerative amplifier