

TW 级 $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 飞秒激光放大器*

张伟力^{1, 2)} 邢岐荣^{1, 2)} 王清月^{1, 2)}

Nelson Cue²⁾ K. M. Yoo²⁾

(1) 天津大学精仪系超快激光研究室, 天津 300072)
(2) 香港科技大学物理系

摘 要 报道 TW(10^{12} W)级 $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 飞秒激光放大器的研究。采用 $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 自锁模激光振荡器和脉冲啁啾放大技术, 获得了能量为 84 mJ、脉宽为 75 fs 的放大光脉冲, 峰值功率达到 TW 量级。

关键词 TW 级, 飞秒, 放大。

1 引 言

利用自锁模 $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 激光器及脉冲啁啾放大技术(CPA)^[1~3], 可产生峰值功率高达 10^{12} W(TW)的飞秒光脉冲, 这样有可能在一般实验室条件下进行强场物理实验(如等离子体, X 射线等)和超快化学动力学研究。目前, 国际上对于 $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 飞秒放大系统的研究主要集中于两个方面, 一是高重复率(>1 KHz) $\mu\text{J}\sim\text{mJ}$ 放大器, 主要用于高重复率泵浦-探测技术、频率转换等超快现象领域的研究; 二是 TW 级低重复率(~ 10 Hz)飞秒放大器, 用于等离子体物理、超快 X 射线产生、多光子电离等强场物理的研究。

TW 级飞秒放大器是一个复杂的光学系统, 通常由飞秒振荡器, 一级增益放大器, 二级能量放大器, 脉冲展宽器及压缩器等部分组成。在飞秒光脉冲实现放大的过程中, 除脉冲展宽压缩系统造成的脉冲位相畸变和色散、增益变窄效应影响脉冲宽度再压缩以外, 由于再生放大器^[4, 5]的采用以及较长增益介质(~ 20 mm), 光脉冲需多次经普克尔盒(PC)和 $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 晶体, 产生大量的三阶色散, 使得 TW 级飞秒光脉冲宽度的压缩受到严重的限制。本工作采用两级多通式脉冲啁啾放大器结构及高浓度 $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 短晶体, 明显减少了光学材料路径, 获得了脉冲能量为 84 mJ、75 fs 高强度飞秒脉冲输出, 峰值功率达到 TW 量级, 脉冲重复频率为 10 Hz。

2 实 验

实验光路如图 1 所示, 包括 $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 自锁模激光器, 脉冲展宽器, 第一级增益放大器,

* 本工作得到香港科技大学(HKUST) RIG No. R191/92. SC05 和香港 RGC Project No. UST 208/93E 资助。

收稿日期: 1995 年 1 月 30 日

第二级能量放大器, 脉冲压缩器、单脉冲自相关器及脉冲选择系统。Ti:Al₂O₃ 自锁模激光器采用腔外棱镜色散再补偿结构, 晶体长度为 4 mm, 耦合输出镜透过率为 10%。当氩离子激光器泵浦功率为 6 W 时, 可输出 20 fs、500 mW 短脉冲, 光谱中心为 800 nm, 脉冲重复率为 83 MHz。光脉冲从振荡器输出后首先经过普克尔盒 PC1, 以选择飞秒单脉冲与放大器泵浦源 Nd:YAG 激光器具有相同的重复频率 10 Hz 并同步。此外 PC1 还用于抑制放大信号对 Ti:Al₂O₃ 激光器的反馈干扰。

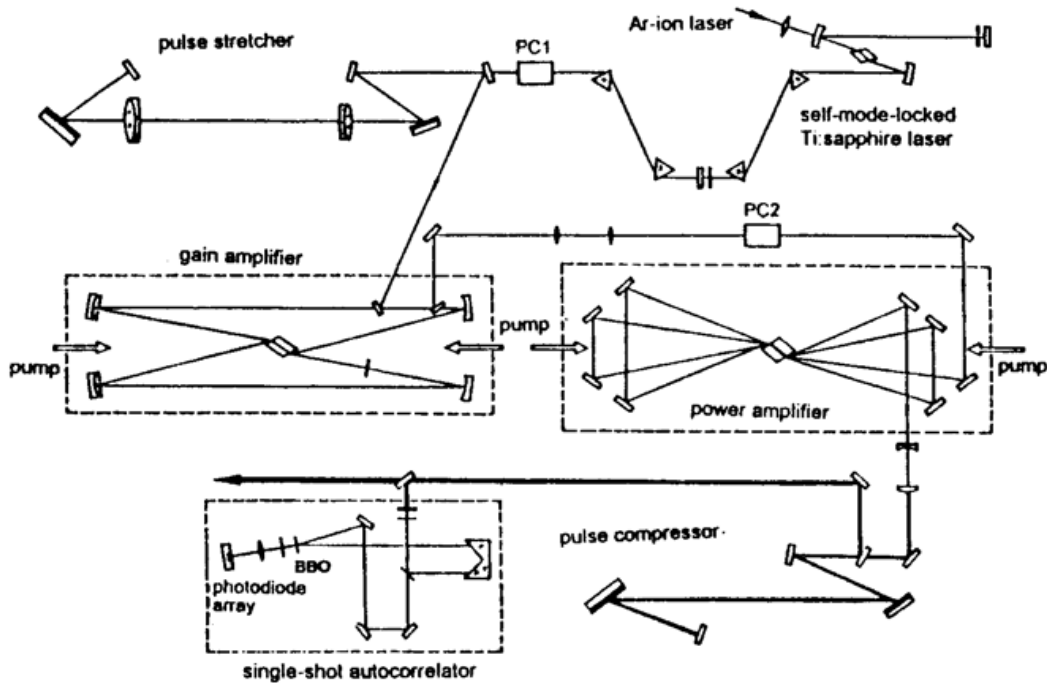


Fig. 1 Schematic of Ti:sapphire amplifier system

脉冲展宽器由光栅对和 1:1 透镜望远系统组成^[6], 用以产生正啁啾, 将飞秒脉冲宽度展宽数千倍。光栅采用 2000 1/mm 镀金全息光栅, 800 nm 处 S 偏振面衍射效率高于 90%。一对焦距 f 为 50 cm 的双胶合消色差透镜组成望远系统, 透镜镀中心波长 800 nm 的增透膜, $df/d\lambda = 0.01$ mm/nm。脉冲进入展宽器时相对于第一个光栅的入射角及衍射角分别为 56° 和 39.4°, 展宽器可将飞秒光脉冲展宽约 5000 倍。为防止放大器光学元件被强光损坏, 通过改变 Ti:Al₂O₃ 激光器的色散补偿、限制光谱宽度, 使其输出脉冲宽度不小于 50 fs, 此时光谱宽度为 19.6 nm。脉冲往返经过展宽器后进入一级放大器, 脉冲宽度达 250 ps。

一级放大器采用由四个球面镜组成的空间共焦多通式结构^[7, 8], 球面镜曲率半径为 1 m, Ti:Al₂O₃ 晶体长为 8 mm, 放置于放大器焦点处, 光脉冲 8 次通过 Ti:Al₂O₃ 晶体实现放大。Nd:YAG 泵浦脉冲能量为 100 mJ, 晶体表面光斑直径 2 mm。考虑到 Ti:Al₂O₃ 晶体损伤通量阈值的限制 (~ 4 J/cm²), 两级放大器均采用 Nd:YAG 激光双向泵浦。为抑制放大过程中的自发辐射放大 (ASE), 在其中一对球面镜前采用空间滤波器, 并在第七、八级放大之间插入可饱和吸收体 RG850, 使放大的自发辐射背景噪声小于 2%。经过一级放大器, 脉冲能量高于 1 mJ。在进入二级放大器之前, 光脉冲首先经过光学扩束系统和另一普克尔盒 PC2。PC2 的作用在于减小放大的自发辐射噪声小于 0.1%, 抑制放大器级间反馈。二级放大器采用由多个平面镜组成的往返四次的平面结构, Ti:Al₂O₃ 晶体长 8 mm, $\alpha_{532} = 3.0$ cm⁻¹。晶体表面放大光束直径为 3.5 mm, Nd:YAG 泵浦光能量为 600 mJ, 聚焦在晶体表面的光束直径为 4.0

mm。在二级放大器与光栅压缩器之间采用 6 倍望远系统将放大脉冲光束展宽至 21 mm。

光栅压缩器采用与展宽器相同参数的衍射光栅,入射脉冲相对于第一个光栅的入射角和衍射角与展宽器保持一致。精确调整第二光栅的衍射角度及两光栅间距,以获得放大脉冲宽度的最佳压缩。经过压缩器后测得放大脉冲能量为 84 mJ,放大的自发辐射小于 1 mJ。单脉冲相关器二次谐波晶体采用厚度为 300 μm 的 BBO 晶体。为保证脉冲测量精度,放大脉冲进入相关器之前,首先通过直径为 3 mm 的光栏,使被测量脉冲具有空间均匀性,即脉冲空间分布趋近方波形状^[9]。二次谐波信号接收采用光电二极管阵列探测器及示波器显示。图 2 为放大光脉冲自相关函数曲线,假设脉冲形状为 sech^2 线型,脉冲宽度为 75 fs。

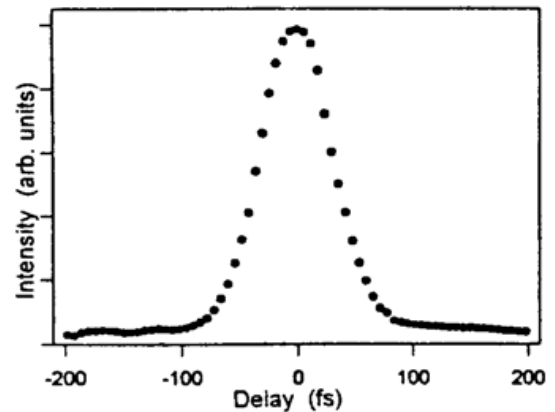


Fig. 2 Single-shot autocorrelation of amplified pulses.

The pulse duration is 75 fs (FWHM) assuming a sech^2 pulse shape

实验研究表明,泵浦源 Nd:YAG 激光模式,放大器级间反馈及光学元件色散等因素直接影响高能量、短脉宽飞秒光脉冲的获得。Ti:Al₂O₃ 晶体的荧光寿命随温度的增高而指数下降,高至 500℃会导致荧光猝灭^[10]。因此要求 Nd:YAG 泵浦光具有较好的高斯模式,而泵浦光斑局部能量密度过高会导致放大脉冲增益的明显降低,尤其对于 10 Hz 运转状态。放大器级间反馈是影响放大器正常工作的另一重要因素。第二级放大器反馈信号进入一级放大器获得反向放大,再进入脉冲展宽器,可导致 Ti:Al₂O₃ 晶体和光栅的破坏,此时光电二极管探测到的放大器信号是一个无规的多脉冲序列。在两级放大器之间插入普克尔盒 PC2,精确调整时间延迟,以抑制级间反馈。放大器中光学材料引起三阶色散,限制脉宽的进一步压缩。通过采用高浓度 Ti:Al₂O₃ 短晶体,以球面或抛物面镜取代望远系统中的透镜可改善放大脉冲压缩。此外,完善脉冲展宽和压缩器结构及放大系统高阶色散补偿,提高泵浦效率,可望获得 20 fs, 100 mJ 高强度输出。

参 考 文 献

- [1] D. E. Spence, P. N. Kean, W. Sibbett, 60 fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(1): 42~44
- [2] J. D. Kmetec, J. J. Macklin, J. F. Young, 0.5 TW, 125 fs Ti:Sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(13): 1001~1003
- [3] C. Le Blanc, G. Grillon, J. P. Chambaret, Compact and efficient multipass Ti:Sapphire system for femtosecond chirped-pulse amplification at the terawatt level. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(2): 140~142
- [4] J. Squier, F. Salin, G. Mourou, 100 fs pulse generation and amplification in Ti:Al₂O₃. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(5): 324~326
- [5] J. Squier, G. Korn, G. Mourou, Amplification of femtosecond pulses at 10 kHz repetition rates in Ti:Al₂O₃. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(18): 625~627
- [6] M. Pessot, P. Maine, G. Mourou, 1000 times expansion/compression of optical pulses for chirped pulse amplification. *Opt. Commun.*, 1987, **62**(6): 419~421
- [7] R. L. Fork, H. Avramopoulos, H. L. Fragnito *et al.*, Amplification of femtosecond optical pulses using a double confocal resonator. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(19): 1068~1070

- [8] J. Zhou, C. Huang, C. Shi, Generation of 21 fs millijoule-energy pulses by use of Ti:sapphire. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(2) : 126~128
- [9] F. Salin, P. Georges, G. Roger *et al.*, Single-shot measurement of a 52 fs pulse. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(21) : 4528~4531
- [10] P. F. Moilton, Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al₂O₃. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1986, **3**(1) : 125~132

Terawatt Femtosecond Ti:Sapphire Amplifier System

Zhang Weili^{1, 2)} Xing Qirong^{1, 2)} Wang Chingyue^{1, 2)}

Nelson Cue²⁾ K. M. Yoo²⁾

- (1) *Ultrafast Laser Laboratory, Department of Precision Instrument Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072*
- (2) *Department of Physics, The Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong*

(Received 30 January 1995)

Abstract A terawatt femtosecond Ti:Sapphire amplifier system is demonstrated. The self-mode locked Ti:sapphire laser pulse is amplified by the chirped-pulse amplifier to the energy as high as 84 mJ per pulse. The pulse duration is 75 fs and the peak power exceeds 1 TW.

Key words terawatt, femtosecond, laser amplifier.