

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0134-03

10 Hz, 23 TW 掺钛蓝宝石激光装置

林礼煌, 徐至展, 李儒新, 王文耀, 江云华, 杨晓东, 冷雨欣, 张正泉, 王益民, 张文琦

(中国科学院上海光学精密机械研究所强激光重点实验室, 上海 201800)

摘要 建成一台 10 Hz, 23 TW 掺钛蓝宝石激光装置, 中心波长为 790 nm。压缩后可在 33.9 fs 期间输出 778 mJ 能量。并报道该激光装置的一些性能。

关键词 飞秒激光; 啁啾脉冲放大; 掺钛蓝宝石激光器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

23-TW Ti:Sapphire Laser System at 10-Hz Repetition Rate

LIN Li-huang, XU Zhi-zhan, LI Ru-xin, WANG Wen-yao, JIANG Yun-hua,
YANG Xiao-dong, LENG Yu-xin, ZHANG Zhen-quan, WANG Yi-min, ZANG Wen-qi

(Key Laboratory for High Intensity Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A 23-TW Ti:sapphire laser system at a repetition rate of 10 Hz has been built. After compression, a final output of 778-mJ/33.9-fs pulse centered at 790 nm was obtained. The characteristics of the 23-TW Ti:sapphire laser system are presented.

Key words femtosecond laser; chirped pulse amplification; Ti:sapphire laser

1 引言

自 1990 年以来, 由于啁啾脉冲放大技术^[1]的使用和宽光谱带宽激光介质的出现, 以及自锁模技术的应用, 超短脉冲产生和放大技术迅速发展, 已被广泛应用到建造多太瓦级激光系统。特别是由于掺钛蓝宝石激光晶体具有优良的激光、机械和热学性能, 在各国激光实验室中已用来建造 10 TW 量级的掺钛蓝宝石激光系统, 高至 100 TW 甚至近拍瓦的掺钛蓝宝石激光系统已有报道^[2-5]。

国内在掺钛蓝宝石激光系统的研究和应用上也很有活跃, 中国科学院上海光学精密机械研究所强激光重点实验室于 1996 年建成了一台 10 Hz, 2.8 TW/43 fs 掺钛蓝宝石激光系统^[6], 随后在 1998 年将该系统升级到 5.4 TW/46 fs^[7]。张伟力报道了建成 1.4 TW 掺钛蓝宝石激光系统^[8], 魏志义报道了 1.4 TW 掺钛蓝宝石激光系统^[9]。

强激光重点实验室自 1996 年以来利用建成的太瓦级掺钛蓝宝石激光系统, 已开展了大量的强场物理和高功率激光与物质的相互作用研究, 例如: 高阶谐波产生, X 射线激光, 激光核聚变, 激光与原子、分子、团簇的相互作用研究等^[10]。为了进一步提

高激光系统的聚焦功率密度, 在已有的 5.4 TW 激光系统上于 2001 年与 2002 年先后升级到 16 TW/33.9 fs 和 23 TW/33.9 fs 的水平, 并开展提高光束质量的研究^[11,12]。本文简要地报道 10 Hz, 23 TW 激光装置的性能。

2 23 TW 激光系统描述

升级后的 10 Hz, 23 TW 激光系统, 其中心波长为 790 nm, 在 33.9 fs 期间可以输出大于 778 mJ 能量。这个峰值功率的实现, 主要是增大了主放大器的光束截面和加大抽运能量到 3.0 J(532 nm)。激光系统由如下部分组成: 自锁模飞秒激光振荡器, 脉冲展宽器, 再生放大器, 前置放大器、主放大器、两套消色差伽利略扩束望远镜、真空空间滤波器和脉冲压缩器。激光装置的光路图如图 1 所示。

由连续二极管激光器抽运的 Nd:YVO₄ 激光倍频 (Verdi V-5, Coherent) 抽运的自锁模掺钛蓝宝石激光振荡器产生 82 MHz, 24.6 fs, 5 nJ 的锁模脉冲列。锁模脉冲列通过一台法拉第光隔离器, 进入无像差脉冲展宽器, 把激光脉冲宽度展宽。展宽器由一块光栅、两个同心球面镜(凹面镜曲率半径为

作者简介: 林礼煌 (1942-), 男, 中国科学院上海光学精密机械研究所研究员。主要从事超短超强激光物理和技术研究。

E-mail: linlh@mail.shcnc.ac.cn

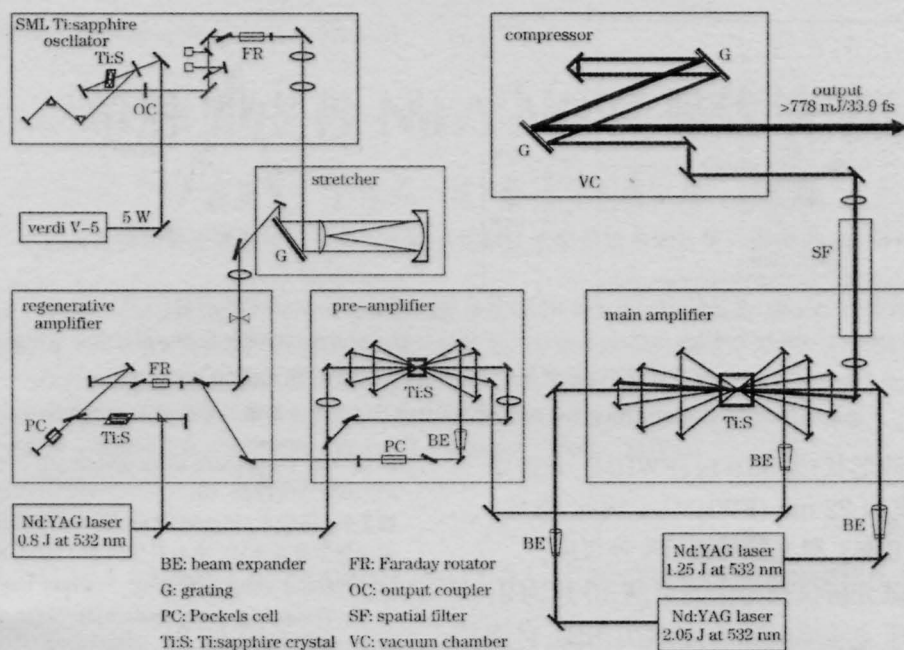


图1 10 Hz, 23 TW 掺钛蓝宝石激光系统的光路图

Fig.1 Layout of the 10-Hz, 23-TW Ti:sapphire laser system

100 cm, 凸面镜曲率半径为 50 cm) 和两组直角反射镜组成。光栅具有 1200 line/mm, 其表面平度为 $\lambda/10$, 入射角为 14.2° , 衍射效率为 91%。输入展宽器的激光脉冲在展宽器内往返 8 次, 脉冲宽度被展宽 >10000 倍, 达到 370 ps(FWHM)。

展宽后的激光脉冲被引向一台再生放大器进行放大。再生放大器由重复频率 10 Hz、小于 40 mJ 的 532 nm 激光抽运。输入的 82 MHz 脉冲列按照 10 Hz 被选择, 被选出的脉冲在激光腔内经过多次往返放大, 然后以腔倒空方式从再生放大器输出。输出脉冲宽度约 220 ps, 能量约 3 mJ。

10 Hz 的放大激光脉冲通过普克尔盒电光开关来增加对比度并防止放大级间的耦合。接着激光束经消色差伽利略扩束望远镜扩大到 4 mm, 进入到前置放大器经 4 程放大, 输出约 70~80 mJ。前置放大器的掺钛蓝宝石晶体厚 15 mm, 两面镀有增透膜, 由 10 Hz, 400 mJ 的 532 nm 激光束从两个方向纵向抽运。

从前置放大器输出的激光脉冲通过一个消色差伽利略望远镜把光束口径扩大到 16 mm, 然后进入主放大器进一步放大。主放大器的掺钛蓝宝石晶体厚 15 mm, 两面镀有增透膜, 由 10 Hz, 3.0 J 的 532 nm 激光束从两个方向纵向抽运。激光脉冲在主放大器经过 6 程放大, 输出最大能量可达 1075 mJ。所有掺钛蓝宝石晶体用恒温循环水进行冷却。

最后, 从主放大器输出的 10 Hz 激光脉冲通过

一个真空空间滤波器扩大光束到 50 mm, 进入到光栅压缩器。光栅压缩器由一对镀金全息光栅、一组直角反射镜组成, 压缩器的光栅与展宽器的光栅相似, 入射角为 18.2° 。光栅压缩器的总透过率约为 72.4%, 得到压缩脉冲能量高于 778 mJ。

3 23 TW 激光系统的主要参数测量

测量了主放大器的输出与抽运能量的关系, 结果如图 2 所示。

压缩后的激光脉冲由一台单次自相关器 (用 CCD 线阵接收) 和光谱仪进行脉宽和光谱带宽的测量, 激光脉冲的自相关迹和光谱示于图 3 中。测得的自相关波形宽度为 52.56 fs (在示波图中, 量得 $\Delta T \approx 72 \mu\text{s}$, 定标得 0.73 fs/ μs), 从而推算出激光脉

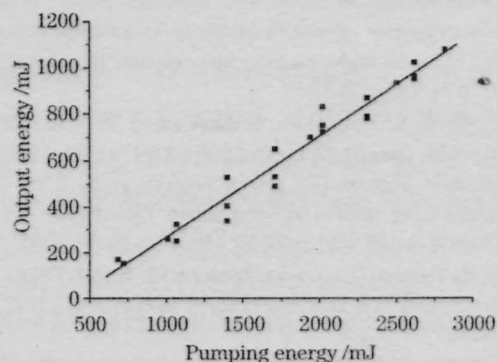


图2 主放大器输出能量与抽运能量的关系

Fig.2 Relationship of extraction energy versus pump energy of the main amplifier

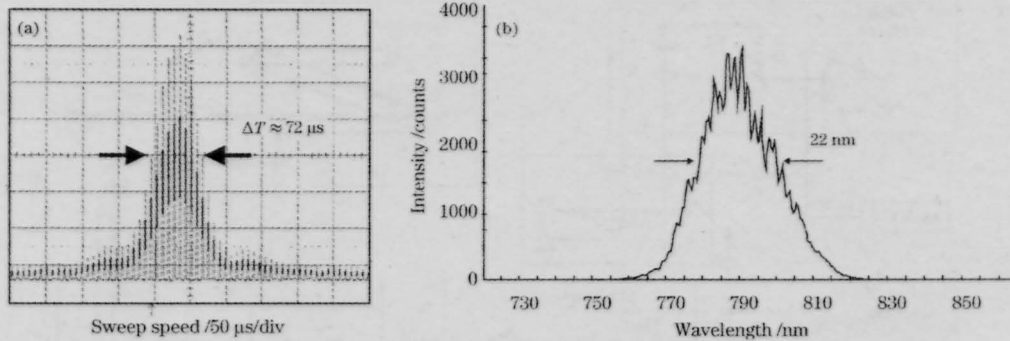


图3 压缩后激光脉冲的自相关线迹(a)和光谱(b)

Fig.3 Autocorrelation trace (a) and spectrum (b) of the compressed laser pulse

宽(假定 sech^2 脉冲形状)为 33.9 fs (FWHM), 光谱中心在 790 nm、带宽为 22 nm (FWHM)。因此, 脉宽-带宽积为 $\Delta\tau\Delta\nu \approx 0.358$, 激光脉冲接近变换极限。

用激光束光斑分析仪测得激光束的 M^2 约为 2。利用光谱相位相干直接电场重构法 (SPIDER), 对输出脉冲的特性进行了测量。测量内容包括输出脉冲的相对相位分布和脉冲强度随时间的变化情况。结果显示, 输出脉冲具有较好的相对相位分布(各光谱之间相对相位差 $< 2\pi$), 输出脉冲半高宽为 33 fs^[13]。

本激光系统放大器所用的掺钛蓝宝石晶体是由本所研制的^[14], 因此能依据需要优化晶体的性能, 使之获得更高的效率和更大的输出能量。进一步展宽光谱宽度以便压缩后获得更窄脉冲, 以及采用可变形镜补偿光束相位畸变的研究正在进行中^[15, 16]。

参 考 文 献

- 1 D. Strickland, G. Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Opt. Commun.*, 1985, **56**(3): 219-221
- 2 K. Yamakawa, M. Aoyama, S. Matsuoka *et al.*. 100-TW sub 20-fs Ti:sapphire laser system operating at a 10-Hz repetition rate[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(18): 1468-1470
- 3 J. D. Bonlie, F. Patterson, D. Price *et al.*. Production of $>10^{21}$ W/cm² from a large-aperture Ti:sapphire laser system [J]. *Appl. Phys.*, 2000, **B70**(Suppl.), S155-S160
- 4 M. Pittman, S. Ferré, J. P. Rousseau *et al.*. Design and characterization of a near-diffraction-limited femtosecond 100-TW 10-Hz high-intensity laser system [J]. *Appl. Phys.*, 2002, **B74**: 529-535
- 5 M. Aoyama, K. Yamakawa, Y. Akahane *et al.*. 0.85-PW, 33-fs Ti:sapphire laser[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(17):1594-1596
- 6 Xu Zhizhan, Vigroux Luc, Saviot Frederic *et al.*. 2 TW/45 fs Ti:sapphire laser system[J]. *Science in China (Ser. A)*, 1997, **27**(7): 640-645
徐至展, Vigroux Luc, Saviot Frederic 等. 输出 2 TW/45 fs 的掺钛蓝宝石超短脉冲强激光系统[J]. *中国科学(A 辑)*, 1997, **27**(7): 640-645
- 7 Xu Zhizhan, Yang Xiaodong, Vigroux Luc *et al.*. 5.4 TW/46 fs table-top Ti:sapphire laser system[J]. *Science in China (Ser. A)*, 2000, **30**(1):63-69
徐至展, 杨晓东, Vigroux Luc 等. 5.4 TW/46 fs 级台式钛宝石超短超强激光系统[J]. *中国科学(A 辑)*, 2000, **30**(1):63-69
- 8 Zhang Weili, Xing Qirong, Wang Qingyue *et al.*. Terawatt femtosecond Ti:sapphire amplifier system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(4): 399-402
张伟力, 邢岐荣, 王清月等. TW 级 Ti:Al₂O₃ 飞秒激光放大器[J]. *光学学报*, 1996, **16**(4): 399-402
- 9 Wei Zhiyi, Zhang Jie, Xia Jiangfan *et al.*. High efficient terawatt femtosecond Ti:sapphire laser facility[J]. *Science in China (Ser. A)*, 2000, **30**(11):1046-1050
魏志义, 张杰, 夏江帆等. 高效率太瓦级飞秒掺钛蓝宝石激光装置[J]. *中国科学(A 辑)*, 2000, **30**(11):1046-1050
- 10 Z. Xu, X. Wang, S. Tian *et al.*. Development and Applications of Ultrafast Intense Lasers at SIOM (Invited), International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science. October 3-6, 2001, Quebec, Canada
- 11 L. H. Lin, Z. Z. Xu, X. D. Yang *et al.*. Multi-terawatt laser systems based on chirped pulse amplification and optical parametric chirped pulse amplification at SIOM, The Third Asian Pacific Laser Symposium, September 17-20, 2002, Osaka, Japan. Technical Digest of APLS 2002, p.73, paper WePA1
- 12 L. H. Lin, Z. Z. Xu, X. D. Yang *et al.*. Recent progress in table-top multi-terawatt laser systems at SIOM, CLEO/PR' 2003, Dec.15-19, 2003, Taipei. Proceedings, p.356, paper W4D-(3)-5
- 13 Chuan Ye, Wang Xingtao, Xu Hongwei *et al.*. Characterization of the output of 15TW/35fs intense laser system by using the method of SPIDER[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1): 65-67
仝 晔, 王兴涛, 徐宏伟等. 用 SPIDER 法测量 15 TW/35 fs 强激光系统的脉冲输出特性[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1):65-67
- 14 Deng Peizhen, Chai Yue, Yan Shenhui *et al.*. Investigation on improvement of laser quality of tunable Al₂O₃:Ti³⁺ crystals [C]. *SPIE*, 1990, **1338**: 207-215
- 15 Yuxin Leng, Lihuang Lin, Wenyao Wang *et al.*. Broadband spectral shaping in a Ti:sapphire regenerative amplifier [J]. *Optics & Laser Technology*, 2003, **35**: 425-429
- 16 Bin Tang, Yuxin Leng, Hanlin Peng *et al.*. The deformable mirror method of adaptive phase correction[J]. *Chinese Opt. Lett.*, 2003, **1**(7): 432-434