

输出 2 TW/45 fs 的掺钛蓝宝石 超短脉冲强激光系统***

徐至展 Luc Vigroux^① Frederic Saviot^① 周建平^② 张正泉***

韩申生 李传东 杨晓东 徐冰 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开放研究实验室, 上海 201800;

①B. M. Industries (Thomson CSF Group), CE 2901 LISSES, 91029 EVRY, Cedex, France;

②Department of Physics, Washington State University, Pullman, WA99164, USA)

摘要 建立了一套基于啁啾脉冲放大技术, 输出峰值功率达到 2.8 TW 的掺钛蓝宝石激光系统. 压缩脉冲的中心波长为 785 nm, 能量为 120 mJ, 脉冲宽度 43.3 fs, 能量稳定性 $\pm 5\%$, 输出的光束质量 $M^2 < 1.5$, 脉冲重复频率 10 Hz, 运转稳定可靠. 整套激光系统实现了小型化, 占用的光学平台不足 10 m^2 .

关键词 固体激光系统 超短脉冲激光 啁啾脉冲放大

近年来, 随着啁啾脉冲放大技术的提出, 在世界范围内迅速掀起了小型化、高功率 ps/fs 激光系统的研究热潮. 这一研究热潮的推动力主要来源于强场物理等领域研究的迫切需要, 在诸如高次谐波发射、超高密度激光等离子体、超快 X 射线源、激光核聚变新概念和小型化高梯度粒子加速器等研究与应用领域^[1], 都需要有 TW(10^{12} W)/亚 ps 的激光系统作为研究工具. 超短、超强激光系统的问世, 不仅使以上研究成为现实, 而且已发现了一系列新的物理现象, 并由此开创了强场激光物理这一崭新的前沿研究领域.

啁啾脉冲放大技术(CPA)的核心是通过光纤或光栅将振荡器输出的超短脉冲在时域上进行展宽, 经放大后再进行压缩^[2]. 由此, 限制脉冲能量提高的主要因素就是激光增益介质的饱和能通量, 而不是像在常规放大器中主要受限于自聚焦效应造成的介质损伤. 因此, CPA 技术一经提出就成为用于克服超短脉冲放大过程中的光学损伤和非线性效应的最重要的技术手段, 被用于各种类型的固体激光系统. 在诸多 CPA 系统的工作介质中, 掺钛蓝宝石(Ti:sapphire)被公认为是获得超强激光脉冲的优选工作介质之一. 这不仅是由于它具有从 660 nm 到 1 100 nm 范围内极宽的增益带宽, 而且其良好的热性能使激光系统能以极高的重复频率运行, 这是钕玻璃和 Cr:LiSFA 等激光介质所不能比拟的, 对生物学和化学等同时要求高平均功

1996-12-09 收稿, 1997-03-06 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目

** 参加本实验室建设的还有黎忠、陆海鹤、吴建光、印定军和项惠珠等同志

*** 联系人

率的应用领域, Ti:sapphire 的应用潜力是显而易见的. 正源于此, 目前已报道的台式 TW 级激光系统中的绝大部分是以 Ti:sapphire 作为工作介质的^[3~5].

近年来, 我们通过国际合作, 在 CPA 系统的发展方面进行了积极而富有成效的努力. 这里所报道的就是已在本实验室建成并投入使用的一套 Ti:sapphire 超短脉冲强激光系统, 其输出脉宽小于 45 fs, 单脉冲能量 120 mJ, 光束的 $M^2 < 1.5$, 重复频率 10 Hz. 该系统使用了输出脉冲宽度小于 25 的自锁模 Ti:sapphire 激光器作为种子信号源, 还使用了全反射式脉冲展宽器, 它可以对脉冲的高阶色散进行调控, 从而保证了 50 fs 以下压缩脉冲的获得; 同时为了避免振荡器的光谱异常可能对系统造成损伤, 使用了一种光谱安全监测器. 系统充分实现了小型化, 所占用的光学平台不足 10 m², 运转稳定可靠.

1 激光系统描述

图 1 为该套激光系统的总体光路图, 它由振荡器、安全保护器、展宽器、再生放大器、多通前置放大器、多通主放大器、脉冲压缩器及相应的泵浦激光器组成, 以下对其作详细介绍.

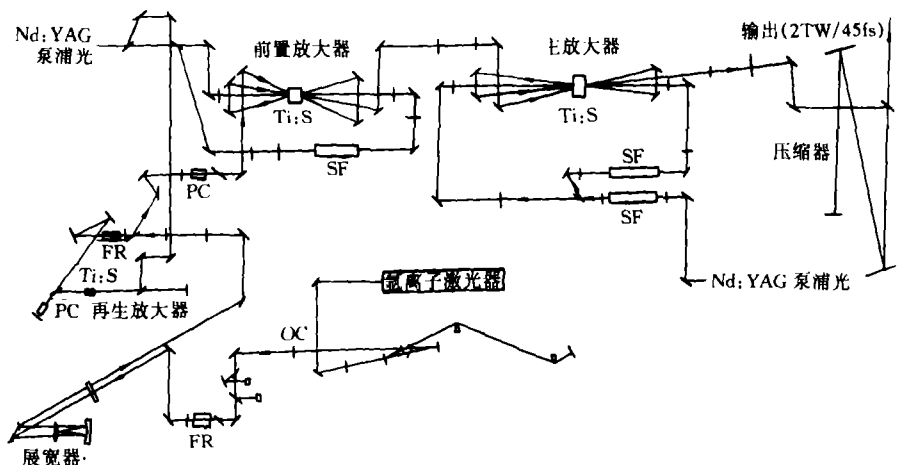


图 1 2TW/45fs 钛宝石激光系统装置图

OC 为输出耦合镜, FR 为 Faraday 旋光器, PC 为 Pockels 盒, SF 为空间滤波器, Ti:S 为钛宝石晶体

1.1 系统的振荡器

自锁模 Ti:sapphire 激光器^[6]的实验装置呈典型非对称 X 型, X 型腔的折叠角约为 16°, 如此小的折叠角有利于减小腔内的各种象差和群速色散的影响. 为了减小高阶色散的产生, 利于与泵浦光的模式匹配和减小热效应影响, 采用高品质因素 (FOM > 150)、高浓度 (0.15%) 的 Ti:sapphire 棒, 长度为 4.75 mm, 端面切除成 Brewster 角. 色散补偿的棱镜对的材料选用三阶色散较小 (-230 fs^3) 的熔凝石英. 激光器输出耦合镜在 790 nm 附近的透过率为 12.5%, 会聚泵浦光用的凸透镜焦距为 105 mm.

细致地调整各光学元件, 当处于自锁模运行最佳腔结构时, 通过简单的光谱监视仪器可以看到此时输出的激光在不同的纵模之间抖动, 这时只要给器件一个轻微的扰动, 即可以实现稳定的自锁模运行. 实验中用透过率为 12.5% 的输出耦合镜时, 得到自锁模运行的阈值泵浦功率为 1.58 W, 脉冲宽度为 48.8 fs, 输出功率为 147 mW. 而连续运转输出功率为 53 mW, 仅为

锁模时的 $1/3$. 这时的自锁模运行可维持几 10 min, 这期间平均功率起伏小于 3%, 这个起伏主要来自氪离子激光器的泵浦光. 一旦停止锁模, 也只要给予一个轻微的扰动即可启动锁模. 当泵浦功率为 2.0 W 时, 激光器的自锁模运转稳定时间大于 2 h.

进一步提高泵浦功率, 在 3.5 W 全线泵浦下, 用透过率为 12.5% 的输出耦合镜. 再细调激光器各个光学元件的位置 (关键是两个小腔镜的间距和 Ti:sapphire 晶体在小腔中的位置) 不需要任何人为的扰动, 即可自启动锁模. 稳定运行时间大于 4 h 以上 (受测量时间限制), 脉冲宽度为 38 fs, 输出功率为 520 mW, 功率起伏小于 5%. 在实验中发现自启动锁模运行并不能得到最短的脉冲输出, 只要重新调节腔内的各元件, 在同样的泵浦功率下, 获得稳定的 32 fs 脉冲输出, 但输出功率下降为 410 mW.

在 3.8 W 全线泵浦下, 我们获得 24.6 fs 的稳定的锁模脉冲输出, 光谱带宽 (FWHM) 为 34 nm, 中心波长在 803 nm, 图 2(a)、(b) 分别为脉宽测量的自相关曲线和对应的光谱曲线, 带

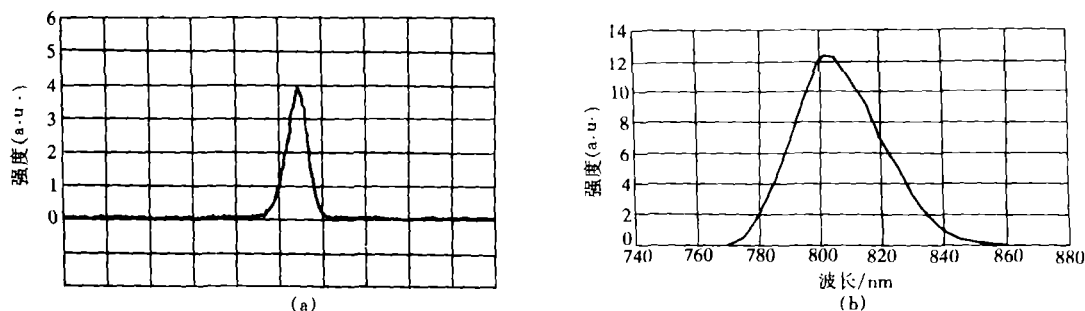


图 2 24.6 fs 激光脉冲对应的扫描自相关曲线

(a) 46 fs/div, (b) 对应的全高半宽为 34 nm 的光谱曲线

宽时间积 $\Delta\nu \times \Delta t = 0.391$, 接近 Sech^2 脉冲的变换极限 0.315, 这表明激光脉冲的群速度色散未被完全补偿. 这时的输出功率为 490 mW, 稳定运行时间大于 2 h. 功率起伏小于 5%. 实验中我们还观测到更宽的光谱带宽 (最宽达 53 nm), 但测到的最短脉宽也为 24.6 fs, 就光谱带宽而言, 完全可支持 20 fs 以下的激光脉冲. 由于激光脉冲在测量时需要通过分光镜、透镜和反射镜等色散元件, 脉冲会因此而展宽, 因此对应于较宽带宽 (>34 nm), 尽管测到的脉宽为 24.6 fs, 但实际输出脉冲宽度小于 20 fs 是完全可能的.

1.2 安全保护器和脉冲展宽器

由振荡器输出的脉冲序列用 Faraday 旋光器进行隔离, 以避免返回的光信号影响锁模器件的稳定性. 在 CPA 过程中, 振荡器的任何不稳定都可能导致展宽脉冲达不到所需宽度, 从而对放大器造成永久性的光学损伤. 为避免这种情况的发生, 在该套系统中安装有一个光谱安全监测装置, 并通过它控制一个快门. 一旦振荡器的光谱出现危险变化, 监测器会自动关闭快门, 切断注入放大器链的种子脉冲, 从而实现系统的安全保护, 同时这套装置也成为判断振荡器是否工作在正常状态的一个重要的辅助工具.

脉冲展宽器为全反射式单光栅展宽器, 由光栅、全反射镜、角反射镜和直角棱镜组成 (图 3), 所用光栅为 1 200 线/mm 的镀金全息光栅, 衍射效率 91%, 入射角为 14.2° . 两个全反射镜分别是曲率半径为 100 cm 的凹面镜和 50 cm 的凸面镜, 它们作共心放置, 这种布置可以使三阶象差为零, 构成一个均匀放大、无象差的望远系统^[7]. 角反射器和直角棱镜使得光束在

空间上折叠行走, 充分利用展宽光栅, 而且减小了展宽器所占用的面积. 整个展宽器的设计可以对附加在脉冲上的高阶色散进行调整, 这对于补偿放大介质和光学元件的高阶色散, 以在压缩中获得高质量的超短脉冲是至关重要的. 脉冲在 4 次通过光栅之后被展宽到约 370 ps, 展宽器总转换效率约为 50%.

1.3 放大器

经过展宽器以及其他一系列光学元件之后到达再生放大器的平均功率只有 200 mW, 单脉冲能量为 2.5 nJ. 要使脉冲在前置放大器 and 主放大器中获得足够的增益, 必须将其放大到 mJ 量级. 为此在前置放大器之前采用再生放大器, 以使脉冲能通过腔内的多程往返而获得需要的增益.

再生放大器为平凹腔, 凹面镜的曲率半径为 10 m, 腔长为 1.6 m. 这种腔结构可以提供较大的腔模体积, 达到利用泵浦光束的软边光阑实现腔模选择的目的, 提高输出光束的横模质量.

再生放大器所用晶体为 Brewster 角放置的 0.15% 掺杂的 Ti:sapphire 晶体, 泵浦源为调 Q 倍频 Nd:YAG 激光器, 脉冲宽度 6 ns, 输出的单脉冲能量为 200 mJ, 用于泵浦再生放大器的能量为 43 mJ. 种子脉冲的注入和放大后脉冲的倒出由一个 Pockels 盒完成, 倒出时间通过同步电路进行控制, 腔内光强的变化通过一个光电管进行监测.

在没有种子脉冲注入时, 再生放大器相当于一个输出 ns 脉冲的增益开关型振荡器, 腔内光场到达最强的建立时间大约为 200 ns, 输出脉冲的能量为 3.0 mJ. 无注入脉冲时输出的自由振荡光谱宽度为 20 nm, 中心波长在 785 nm, 该光谱宽度可支持宽度为 32 fs 的变换极限脉冲.

注入种子脉冲时, 再生放大器腔内光场到达最强的时间为 160 ns. 为提高脉冲之间能量的稳定性, 倒出脉冲的时间比光场最强的时间晚一个往返周期, 以利用腔内的增益饱和和提高脉冲的稳定性. 这样, 脉冲在腔内往返 12 次以后倒出, 其能量放大至 1.5 mJ, 光束直径约 0.8 mm, 能量放大倍数为 6×10^5 . 倒出的脉冲经过一个 Faraday 旋光器注入前置放大器, 在前置放大器之前有一个脉冲选择器, 用以消除寄生振荡造成的 ns 范围内的起伏脉冲. 这样, 脉冲在 ns 范围内的对比度被提高到 1×10^{-4} 左右. 再生放大器输出的脉冲经过扩束透镜组扩束至 4 mm 直径之后注入前置放大器和主放大器.

系统的前置放大器采用双向相对泵浦的三程放大方式, 并与再生放大器共用一台倍频 Nd:YAG 激光器, 其泵浦能量为 150 mJ, 所用晶体的厚度为 15 mm, 双面镀双色增透膜, 晶体的截面为 10 mm $\times$ 10 mm. 泵浦光束在晶体两端面的直径约 8 mm, 空间模式为中间平顶的超 Gauss 光束. 双向泵浦和超 Gauss 光束的使用可以在较低的峰值泵浦功率密度的条件下获得较大的增益. 脉冲在经过前置放大器之后的单脉冲能量为 30 mJ, 放大倍数 20 倍, 单程小信号增益系数为 1.0.

前置放大器输出的光束被扩束至 $\phi 9$ mm 之后注入主放大器. 主放大器也是三程放大, 双向传输的两束泵浦光的总能量为 720 mJ, 晶体厚度 15 mm, 截面为 15 mm $\times$ 15 mm. 脉冲在主放大器中被放大至 250 mJ.

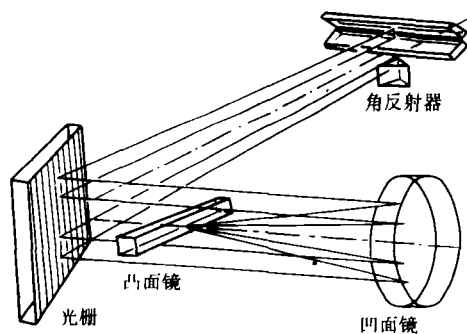


图3 无象差脉冲展宽器装置图

其中凸面镜和凹面镜共心放置

在主放大器之后测量光谱, 输出脉冲光谱的 FWHM 为 18 nm. 同其他已经报道的 CPA 系统一样^[8], 放大之后脉冲的光谱不仅变窄, 而且由于放大中增益饱和的影响, 脉冲光谱会变得不对称, 在该系统中, 放大之后的光谱最强在 790 nm 附近.

1.4 脉冲压缩器

系统的最后一部分是脉冲压缩器. 从主放大器出来的激光脉冲经过扩束透镜被扩束至 $\phi 50$ mm, 以使脉冲的能通量远低于压缩光栅的损伤值, 大的光束口径也可以避免因脉冲传输中的非线性效应而降低脉冲光束的质量.

脉冲压缩器由一对镀金的光栅和角反射器组成, 脉冲在压缩器内经过一个来回之后完成啁啾脉冲放大的全过程而输出. 从理论上讲, 压缩光栅对应该与展宽光栅有相同光学参数, 然而由于放大过程中的增益饱和效应使得脉冲的放大脉冲的中心波长有 5 nm 左右的移动, 同时为了补偿放大介质引入的线性色散, 压缩器光栅之间距离相对于展宽器较大, 光栅入射角也相应地有所变化. 因此压缩器的光栅对必须仔细调整, 以达到最窄脉冲宽度, 在本系统中, 压缩光栅的入射角为 18.2° .

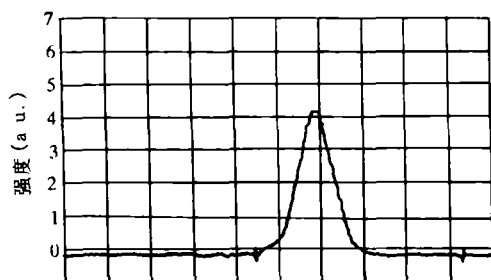


图 4 脉宽为 43.3 fs 的压缩脉冲的自相关曲线
(38.9 fs/div)

压缩脉冲的宽度利用一台单发自动相关仪进行测量. 图 4 为最终压缩脉冲的自相关曲线, 脉冲的半宽度为 43.3 fs, 调试中达到的最窄脉冲宽度为 40 fs. 压缩脉冲的时间-带宽积为 0.375, 为变换极限的 1.2 倍, 这表明此时压缩已经调整到比较理想的状态. 压缩之后脉冲的能量为 120 mJ, 由此脉冲的峰值功率达到 2.8 TW, 能量稳定度为 $\pm 5\%$.

图 5 为输出激光束在近场的光强分布. 对于

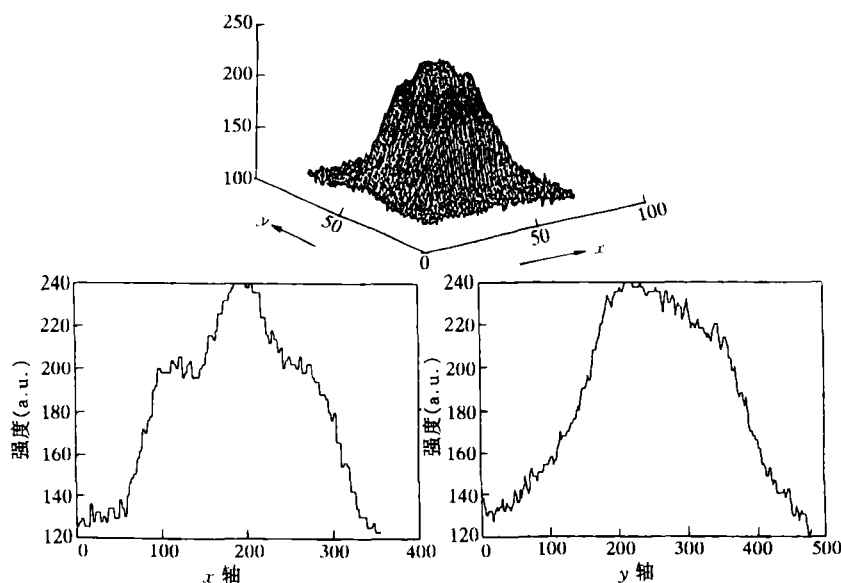


图 5 利用 CCD 记录的激光束的近场光强分布

强场物理研究, 更关心的是可聚焦功率. 为此我们测量了系统输出的光束质量. 我们用焦距为 50 cm 的透镜对输出光束进行聚焦, 利用高动态范围的 CCD 照相机在焦点附近逐点测量传输中的光束的大小. 图 6 为聚焦光斑在焦点附近的变化情况, 同时绘出的还有 $M^2 = 1$ 的理想 Gauss 光束和 $M^2 = 1.5$ 的光束相同条件下在焦点附近的变化情况, 由此可以得知, 压缩光束的 $M^2 < 1.5$.

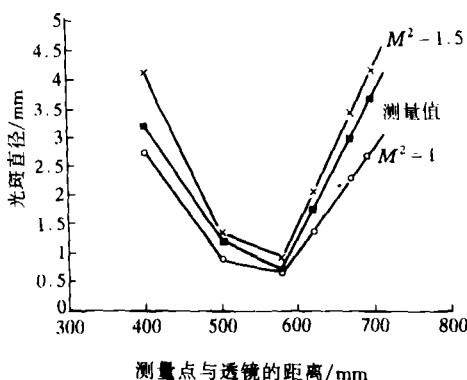


图 6 $M^2 = 1$ 和 1.5 的理想 Gauss 光束以及本系统输出光束的直径在焦点附近的变化聚焦透镜焦距为 500 mm

2 结束语

本文实验室建成的一套输出 2.8 TW 的 Ti:sapphire 小型化超短脉冲强激光系统, 输出脉冲宽度 < 45 fs, 最窄脉宽可达 40 fs.

从系统本身来看, 已超过了原定设计指标, 但仍有潜力可挖. 从前面的介绍可见, 脉冲的光谱宽度在再生放大器内由 37 nm 下降到 22 nm, 而前置及主放大器的透过光谱的 FWHM 可以达到 30 nm 左右, 相应地可以满足 30 fs 以下脉冲放大所需的光谱宽度. 因此, 如果可以解决再生放大器的光谱限制, 系统性能可进一步提高; 适当增大多通主放大器的泵浦能量, 激光系统的输出升级到 4 TW 以上是完全可能的.

参 考 文 献

- 1 Joshi C J, Corkum P B. Interactions of ultra-intense laser light with matter. Phys Today, 1995, Jan. 36
- 2 Strickland D, Mourou G. Compression of an amplified chirped optical pulses. Opt Commun, 1985, 56(2): 2 198
- 3 Barty C P J, Gordon III C L, Lemoff B E. Multiterawatt 30-fs Ti:sapphire laser system. Opt Lett, 1994, 19(18): 1 442
- 4 Lenzner M, Spielmann C H, Wintner E, et al. Sub-20fs, kilohertz-repetition-rate Ti:sapphire amplifier. Opt Lett, 1995, 20(12): 1 397
- 5 Barty C P J. Ten-femtosecond amplifier creates multiterawatt pulses. Laser Focus World, 1996, 32(6): 93
- 6 徐 冰, 周建平, 王益民, 等. 自启动、长时间稳定、低功率泵浦的超短脉冲掺钛蓝宝石激光器. 光学学报, 1996, 16(7): 1 023
- 7 Du D, Squier J, Kane S, et al. Terawatt Ti:sapphire laser with a spherical reflective-optic pulse expander. Opt Lett, 1995, 20(20): 2 114
- 8 Rouyer C, Mazataud E, Allais I, et al. Generation of 50TW femtosecond pulses in a Ti:sapphire/Nd:glass chain. Opt Lett, 1993, 18(3): 214