

文章编号: 1001-3806(2004)05-0469-03

星光[⊕]高功率固体激光驱动器研究的新进展

王成程, 袁晓东, 秦兴武, 陈清海, 党 钊, 唐晓东, 魏晓峰, 郑万国
(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

摘要: 介绍了星光[⊕]高功率固体激光驱动器的发展历程和物理实验的进展情况, 研制了用于开展激光等离子体中电子密度与电子温度精密化诊断的两束探针光系统。阐述了激光装置中新能源系统的模块化设计方法以及新型集中控制系统的最新研究进展情况, 所用方法和所得结论对高功率固体激光驱动器系统的设计具有一定应用意义。

关键词: 基准物理实验; 激光等离子体; 探针光系统; 高功率固体激光驱动器

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Recent advances of XG[⊕] high power solid-state laser facility

WANG Cheng-cheng, YUAN Xiao-dong, QIN Xing-wu, CHEN Qing-hai,
DANG Zhao, TANG Xiao-dong, WEI Xiao-feng, ZHENG Wan-guo
(Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: In this paper, the development of XG[⊕] high power solid-state laser facility and the physical experimental research are briefly introduced. A system with two probe laser beams has been developed based on XG[⊕] high power solid-state laser facility which is used for laser plasma diagnostic experiments. The design optimization method of energy system and new research progress of concentrate control system of the laser facility has also been explained here, and the methods and results obtained in this paper are applicable to the design of high power solid-state laser system.

Key words: benchmark experiments; laser plasma; probe laser beam system; high power solid-state laser

引 言

在高功率固体激光驱动器 30 多年的发展历程中, 各种单元技术得到了飞速的发展。世界许多国家的著名实验室如美国里弗莫尔实验室、法国里梅尔实验室、日本大阪大学激光工程中心等成功研制了各种规模和水平的高功率激光装置^[1~3]。美国利弗莫尔实验室从 70 年代开始建造大型高功率固体激光系统, 在高功率激光装置的研究方面一直处于世界领先地位, 先后建造了 Janus(1974 年), Argus(1976 年), Shiva(1977 年), Novette(1983 年), Nova(1984 年) 等固体激光系统^[4]。星光[⊕]激光装置是我国用于惯性约束聚变(ICF)基础实验研究、X 射线激光研究和激光等离子体参数研究的一台大

型、综合性高功率固体激光装置。自 1985 年建成至今, 利用星光[⊕]激光装置已经开展了多项大型实验研究, 取得了一系列研究结果^[5~7]。为了加快 ICF 实验研究与理论模拟结合的进程, 需要在星光[⊕]激光装置上开展基准物理实验研究, 从而对激光等离子体中的电子温度、电子密度分布状况进行深入量化的分析。目前, 国际上大多采用脉宽较窄的紫外光作为探针来进行诊断测量的方法, 它具有较高的时空分辨率, 可以在短时间内冻结高速运动的等离子体图像从而获得许多重要的物理信息, 如等离子体电子密度的空间分布、不均匀性喷流结构、等离子体中的不稳定现象等^[8]。为满足这一要求, 自 1999 年起, 先后建立了两束激光探针系统, 初步具备了开展探测等离子体中电子温度和密度实验研究的能力^[9], 但是, 这两束探针光系统的稳定性及可靠性不高, 不能深入有效地开展激光等离子体基准物理实验研究。因此, 为了提高装置的运行稳定性, 改善激光装置的性能, 于 2002 年底, 对星光[⊕]激光装置的探针光系统、能源系统、自动控制系统进行全方位的改造和重建, 使星光[⊕]激光装置的运行能力有了

基金项目: 国家八六三计划惯性约束聚变领域资助项目(8301)

作者简介: 王成程(1974), 男, 助理研究员, 主要从事高功率固体激光技术研究。

E-mail: wangchch_caep@yahoo.com.cn

收稿日期: 2003-10-20; 收到修改稿日期: 2003-12-04

较大的提升,初步满足了基准物理实验的要求。文中重点介绍了星光 \odot 激光装置在探针光系统、能源系统、自动控制系统改造过程中的最新进展情况,实践中所采用的方法对高功率固体激光驱动器的设计具有一定的指导意义。

1 装置简介及工作原理

星光 \odot 激光装置器件部分主要由主束激光系统、子束激光系统组成,如图1所示。其中主束激光系统可以输出波长为 $1.054\mu\text{m}$, $0.53\mu\text{m}$, $0.35\mu\text{m}$ 的脉冲激光束,对应的最大激光能量分别为260J,150J,130J。在物理实验期间,可以根据实际需要输出不同能量水平的脉冲激光束进行物理实验打靶。

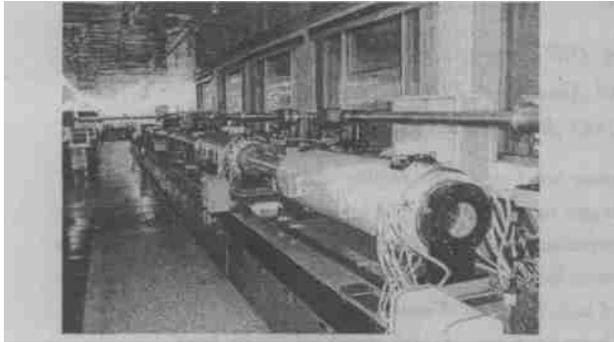


图1 星光 \odot 激光装置器件系统

子束激光系统作为两束探针光束的光源,可以输出能量小于40J的激光束,子束激光经分光取样后,分成两束激光,一束激光经小孔光阑与空间滤波器组成的像传递系统后,由两块BBO晶体倍频后输出 $0.527\mu\text{m}$ 的二倍频光,再经过反射镜进入充有 CO_2 和 H_2 的两个喇曼压缩池输出 $0.308\mu\text{m}$ 的紫外探针光,紫外探针光束经光学系统传递后入射到靶点上,作为一束探测光束。分光取样后的第2束激光经过反射镜导向后由两块KDP晶体倍频后输出 $0.263\mu\text{m}$ 的四倍频激光,这束激光经光束反转器后以与水平方向成 45° 角入射到缩束透镜聚焦于靶

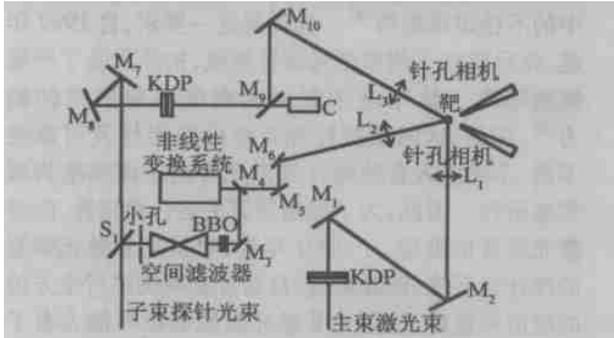


图2 星光 \odot 激光装置靶场光路示意图

点。系统工作原理为:一束波长为 $1.054\mu\text{m}$ 、光束

口径为 $\approx 160\text{mm}$ 的基频光经过iv, \oplus 类匹配的KDP晶体倍频器后输出波长为 $0.351\mu\text{m}$ 的三倍频主激光,主激光束经大口径透镜缩束聚焦于靶点上,产生激光等离子体,与主激光束具有固定延时的两束探针光束同时入射到激光等离子体中,实现对激光等离子体中电子密度和电子温度的精密化诊断,三束激光打靶示意图如图2所示。

2 星光 \odot 激光装置装置技术改造

2.1 探针光系统工程化改造

在探针光系统的改造过程中,分析了系统不能稳定运行的原因:(1)子束激光系统输出激光束能量稳定程度及光束质量欠佳;(2)原有探针光系统支撑架及光学系统分散不稳。针对这两方面原因,对子束激光系统进行了重新优化设计,改善了子束激光系统输出激光束能量的稳定程度以及光束的近场分布,获得了较好的探针光源^[10]。另一方面,对不稳定的紫外探针光系统进行了重新设计和工程化改造,将探针光系统的支撑工作台与靶室真空系统分离开来,消除了物理实验期间真空系统运行对探针光系统支撑台震动的影响,同时将探针光系统进行了一体化的工程设计,将原来分散固定的光学系

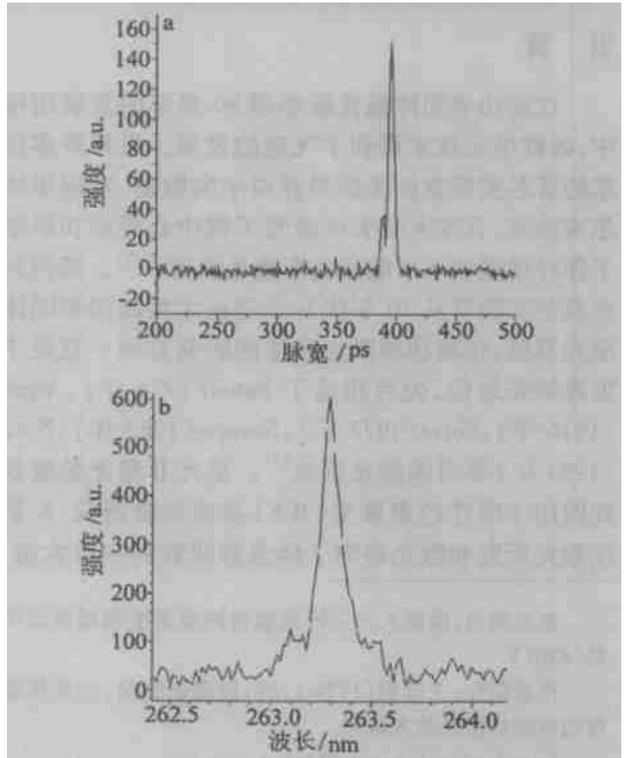


图3 a—实验中获得的波长为308nm紫外探针光脉宽曲线($T=28.8\text{ps}$) b—实验中获得的波长为263nm的汤姆逊散射光光谱曲线

统进行了整体加固,保证了探针光系统的工作稳定性。通过这两方面的改造,对探针光系统进行了实验调试,获得了稳定输出的波长为 $0.308\mu\text{m}$ 的紫外探针光,输出能量大于 1mJ 、脉宽小于 50ps ;获得的波长为 $0.263\mu\text{m}$ 的汤姆逊散射光输出能量大于 4J (见图 3),满足了激光等离子体基准物理实验对探针光系统的参数要求。

2.2 新能源系统的研制

能源系统是进行惯性约束聚变研究的高功率固体激光驱动器的重要组成部分,它为驱动器中激光放大器的脉冲氙灯提供脉冲能量^[11,12]。星光 ① 激光装置原来的能源系统是在 80 年代末期设计制造的,在充电机的设计中采用的是 $L-C$ 谐振恒流充电方案,这种工作方式不仅使能源系统占地庞大,而且使用元器件分散、数量多,经常发生强电干扰故障,不便于查找故障原因和对系统进行维护,由于充电机的重复精度较差,这一缺点使得储能模块为激光器件系统中放大器提供能量出现较大误差,导致激光器发射激光束能量的起伏,直接影响物理实验的结果。为了进一步提高星光 ① 激光装置的运行稳定性、提高装置的自动化运行能力,对星光 ① 激光装置的能源系统和控制系统进行了全方位的重建。在新能源和控制系统建造过程中,采用了串联谐振高频逆变器构成充电电源,由于高的工作频率,使用了高效的铁磁材料,不仅使得充电机体积小、重量轻(如图 4 所示),而且由于开关管工作在软开关状态,故开关损耗小,电路变换效率提高。另一方面,由于开关的通、断均在电流过零时刻,电路产生的电磁干扰小,使得系统安全可靠。



图 4 星光 ① 激光装置能源系统

2.3 自动化集中控制系统

控制系统是大型高功率固体激光驱动器的神经网络,关系到系统中每一个设备和元器件,其工作的可靠性直接决定整台装置发射激光的成败,对物理实验产生直接影响。在能源系统、激光器件系统、靶

场系统的控制系统建造过程中,采用了分层控制的思路,并采用了稳定可靠的工业计算机作为总控制中心,实现了对能源模块和能源数据采集模块的远程自动化控制,在整体设计思想上实现了高度集中控制,如图 5 所示。在新建成的集中控制系统中采用了光纤通信和光纤传输同步控制信号,提高了整个系统的抗干扰能力,并且通过软件系统的监控采集,使得激光器的运转时刻处于全过程监测之中,提高了系统运转的安全性能。



图 5 星光 ① 激光装置集中控制系统

3 结束语

在我国新一代高功率固体激光驱动器建成之前,星光 ① 高功率固体激光装置作为大型 ICF 实验研究的平台在国防科研领域有着非常重要的应用前景。在历时一年半的星光 ① 激光装置改造和重建过程中,充分吸收了国内外激光驱动器的研究成果和经验^[13,14],兼顾装置发展和实验要求的双重需要,采用了模块化设计、集中控制和光纤通讯等新思路,使得各单元技术的改造取得了显著的成绩,这些措施不仅极大地提高了星光 ① 激光装置的安全性、抗干扰能力、运行稳定性和自动化运行能力,同时也提高了装置的运行效费比。通过一段时间的大型调试,整个系统表现出了较好的运行状态,随着高功率固体激光驱动器技术的不断发展,这些研究成果的取得必将为激光等离子体基准物理实验研究的顺利开展和我国新型强激光源的可持续发展打下坚实的基础。

参 考 文 献

- [1] ERLANDSON A C, ROTTER M D, FRANK D N *et al.* Design and performance of the beamlet amplifiers [S]. UCRL- LR 105821-95-1, 1995. 18~ 28.
- [2] ERLANDSON A C, LAMBERT H, ZAPATA L E *et al.* The effect of amplifier component maintenance on laser system availability and reliability for the US national ignition facility [J]. SPIE, 1996, 3047: 138~ 147.

(下转第 475 页)

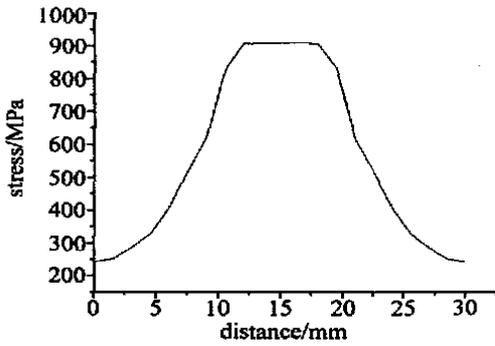


Fig. 7 Mises equivalent stress in the laser spot area

4 结论

激光扫描过程中, 光束辐照区域经历非常剧烈的热循环, 在光斑附近积聚较高能量, 因此, 形成超过半钢材质相变点的高温区, 其热影响区内的分布规律及瞬态热应力分布规律为: (1) 与高温热影响区对应, 在光斑附近存在一个剧烈变化的温度梯度区, 其中以光斑前进方向的数值最为突出, 最大值可达 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$, 在光斑外部, 此值迅速衰减; (2) 光斑附近区域的热循环速度也呈现剧烈的变化规律, 在光斑内部其数量级可达 $10^3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s} \sim 10^4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 此值

与激光功率和扫描速度成正比; (3) 扫描瞬时光斑内部出现压应力, 其中以 z 向应力最为突出, 在扫描过后残余热应力表现为拉应力; (4) 激光处理残余应力除了考虑热影响外, 必须结合相变过程中因比容变化引起的组织应力。

参 考 文 献

- [1] YANEZ A, ALVAREZ J C. Modeling of temperature evolution on metals during lasers hardening process [J]. Applied Surface Science, 2002, 186: 611~ 616.
- [2] de la CRUZ P. Effect of laser hardening on the fatigue strength and fracture of a B-Mn steel [J]. Int J Fatigue, 1998, 20(5): 389~ 398.
- [3] 游 敏, 郑小玲. CO_2 激光焊接残余应力测试与分析 [J]. 焊接技术, 2002, 31(3): 17~ 18.
- [4] van BRUSSEL B A, de HOSSON J T M. Residual stresses in the surface layer of laser-treated steels [J]. Materials Science and Engineering, 1993, 161: 83~ 89.
- [5] WABG H G, GUAN Y H. A study of thermal stresses during laser quenching [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997 (63): 550~ 553.
- [6] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. 120~ 356.
- [7] HU D Y. Simulation of thermo-mechanical behavior and interfacial stress of metal matrix composite under thermal shock process [J]. Composite Structure, 2000, 48: 113~ 118.
- [8] 干涉法 [J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(2): 254~ 256.
- [9] 向 勇, 袁晓东, 徐 冰 *et al.* 用于激光等离子体诊断实验的二倍频探针光系统 [J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(s1): 201~ 204.
- [10] 王成程, 陈清海, 邓 武 *et al.* 用于 ICF 基准物理实验的子束激光系统优化设计 [J]. 光学与光电技术, 2003, 1(5): 35~ 38.
- [11] 力一峥, 周丕璋, 薛锡钢 *et al.* 强激光能源系统预电离实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(2): 178~ 180.
- [12] 周丕璋, 郭良福, 陈德怀 *et al.* 激光聚变主放大器能源系统述评 [J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(4): 178~ 180.
- [13] 克希奈尔 W. 固体激光工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 39~ 54.
- [14] 吕百达. 固体激光器件 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002. 180~ 200.

(上接第 471 页)

- [3] ERLANDSON A C, ALGERT, HORVATH J *et al.* Flashlamp-pumped Nd:glass amplifiers for the national ignition facility [J]. Fusion Technology, 1988, 34: 1105~ 1111.
- [4] 王成程, 郑万国, 於海武 *et al.* 两种新型不同泵浦腔构型片状激光放大器性能分析 [J]. 激光与红外, 2002, 32(6): 397~ 399.
- [5] 郑万国, 魏晓峰, 张小民 *et al.* 高功率激光的三倍频高效转换实验 [J]. 强激光与粒子束, 1995, 7(3): 417~ 421.
- [6] 郑志坚, 曹磊峰, 张保汉 *et al.* X 光 Cabor 波带片编码成像技术实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 759~ 763.
- [7] 曹磊峰, 郑志坚, 丁永坤 *et al.* X 光环孔编码成像技术研究 [J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 764~ 768.
- [8] 彭能岭, 李文洪, 江少恩 *et al.* 等离子体电子密度诊断的全息