

文章编号: 1001-4322(2002)05-0669-05

天光一号 MOPA 光学角多路系统的研制*

龚 堃, 马景龙, 向益淮, 戴 辉, 高智星, 单玉生, 王乃彦

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要: 光学角多路系统是主振功放(MOPA)装置的重要组成部分。它不仅连接着主振荡器、预放大器及主放大器三个 KrF 激光系统,而且起着压缩激光脉宽的作用。光学角多路能使主振激光脉冲在能量上得到足够的放大,并使泵浦预放、主放激光腔的电子束能量及其脉宽得到充分的利用。介绍了天光一号装置上 MOPA 光学角多路系统的结构,并结合多年来运行的实践,提出了若干优化措施。

关键词: 主振功放系统; 光学角多路; 激光放大

中图分类号: TN248

文献标识码: A

光学角多路系统是主振功放(MOPA)装置的重要组成部分。它连接着主振荡器、预放大器及主放大器三个 KrF 激光系统,并起着压缩激光脉宽的作用。光学角多路能使主振激光脉冲在能量上得到足够的放大,并使泵浦预放、主放激光腔的电子束能量及其脉宽得到充分的利用。

从美国首次提出 MOPA 光学角多路的概念设计^[1,2]至今,许多国家已经建成了不少 MOPA 光学角多路系统^[3-5]。天光一号装置的 MOPA 光学角多路建成于 1998 年。

本文重点介绍了天光一号装置上 MOPA 光学角多路系统各部分的组成结构,根据运行实践,提出了包括镜架、镜片材料、镜片镀膜、激光脉冲波形及能量监测等的优化措施。并展望了 MOPA 光学角多路在提高光束品质和能量升级等方面的前景。

1 天光一号 MOPA 光学角多路系统的组成

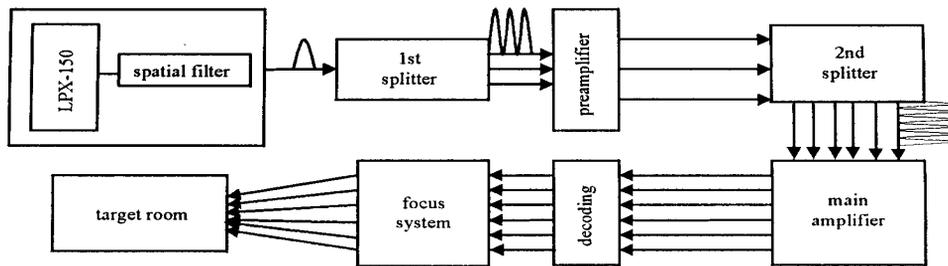


Fig. 1 Diagram of the angular multiplexing system

图 1 光学角多路示意图

如图 1 所示,天光一号装置的 MOPA 光学角多路系统的光路由以下部分组成:前端激光器注入光路,一次分束光路,预放大激光器输入、输出光路,二次分束光路,主放大器输入、输出光路,消延迟光路及注入靶室的聚焦光路。MOPA 光学角多路光路的全程约 140m,除三个激光器和聚焦靶室外,其余光路的光学器件全部安置在 130m² 空间的激光角多路大厅中。

1.1 前端、预放及主放

前端激光器注入光路,包括一台放电泵浦 KrF 激光器(LPX-150)与一级空间滤波器。LPX-150 产生一个脉宽为 23ns,波长为 248nm,能量约 300mJ 的主振激光脉冲。作为 MOPA 系统的种子光源,它经过一级空间滤波器后直接导入一次分束光路。注入的激光脉冲的光斑如图 2。

预放大器和主放大器电子束泵浦的功率脉冲宽度分别为 90ns 与 180ns。它们分别可容纳三束与六束 23ns 的主振激光脉冲。预放及主放输入输出光路器件包括:阵列式输入、输出透镜,激光腔前后平面窗镜与球

* 第四届全国准分子激光学术研讨会推荐优秀论文。

收稿日期:2002-07-20; 修订日期:2002-08-21

基金项目:国家 863 惯性约束聚变领域资助课题

作者简介:龚 堃(1941-),男,研究员,从事 ICF 有关实验工作,现任 MOPA 光学角多路子课题负责人;北京市 275-7 信箱。

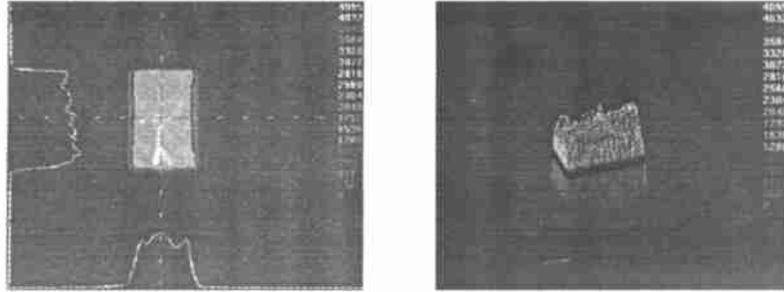


Fig. 2 Profile of the input laser pulse

图 2 注入的激光脉冲的光斑

面全反后腔镜。它们组成一组望远镜系统,实现输入激光束的双程放大。预放输入、输出激光束的截面是相等的;而主放输出激光束的截面大于输入激光束的截面,以提高镜片光学薄膜的抗激光损伤能力。预放大及主放大激光器输入、输出光路的主要光学参数见表 1 所示。

表 1 预放大及主放大激光器输入、输出光路的主要光学参数

Table 1 Chief optical parameters in the input & output path of preamplifier and main amplifier

	preamplifier	main amplifier
diameter of input lens/ mm	30	30
focus of input lens/ m	2	1.4
diameter of output lens/ mm	30	90
focus of output lens/ m	2	7.5
distance between lens and rear cavity mirror/ m	10	17
ratio of input beam blooming	1.6	1.13
ratio of output beam reduction	6.1	13.3
geometric extraction efficiency/ %	86.5 ~ 95.1	83.4 ~ 93.8

经预放大和主放大后的输出激光束光斑分别如图 3 和图 4 所示。

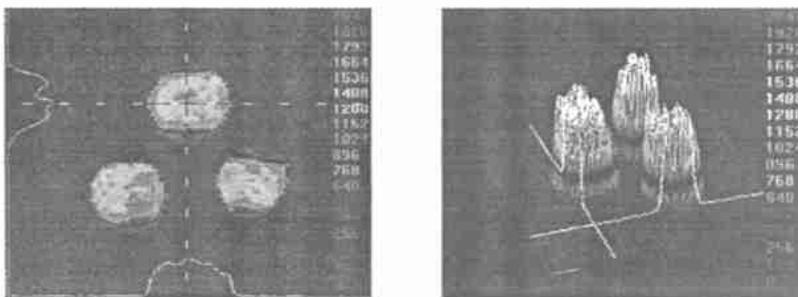


Fig. 3 Profile of the three amplified laser pulse in preamplifier

图 3 经过预放大器双程放大后的三束激光

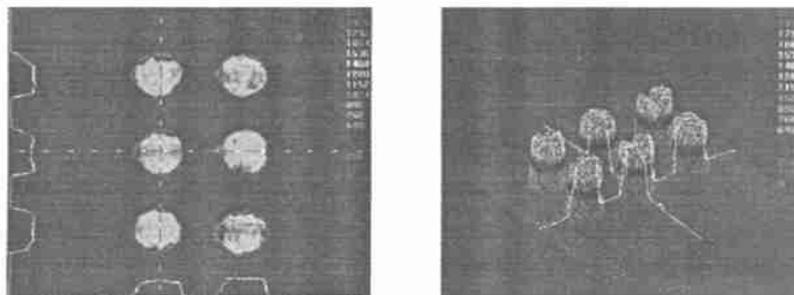


Fig. 4 Profile of the six amplified laser pulse in main amplifier

图 4 经过主放大器双程放大后的六束激光

预放大及主放大激光腔前、后平面窗镜的寿命是维持 MOPA 系统稳定工作的重要因素。除了提高激光腔工作气体纯度外,实现激光腔高真空状态下充气可以提高镜片的寿命。

用三维光线追迹计算了预放大器和主放大器中输入、输出透镜以及球面全反镜组合的像差,综合考虑了球差、慧差、像散和色散,给出在 1m 焦距透镜的焦平面上的结果,如图 5 所示。可见像差对焦斑的影响小于 $\phi 3\mu\text{m}$ 。

1.2 一次分束和二次分束

注入的主振激光脉冲,由一次分束光路编码分成间隔为 20ns 的三束激光序列。经过预放大器放大后输出的三束激光序列,再经过二次分束光路编码分成间隔为 20ns 的六束序列。

分束光路的光学器件均由透反比 (T/R) 为 2 的分束镜及若干平面全反镜组成。经一次分束光路后,三束激光序列脉冲的能量为每束约 40~60mJ。经二次分束光路后,六束激光序列脉冲的能量每束约 1~2J。每束激光脉冲之间的时间间隔由不同距离上平面全反镜间的光程延长而实现。

到达预放大和主放大的激光束序列分别如图 6 与图 7 所示。

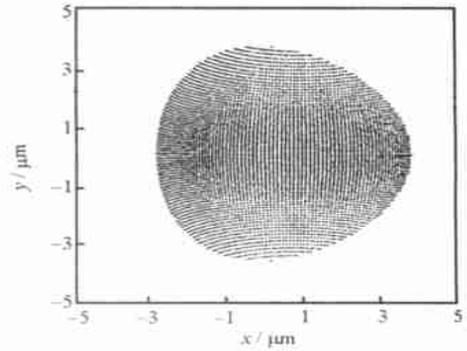


Fig. 5 Aberration of the system
图 5 系统的综合像差

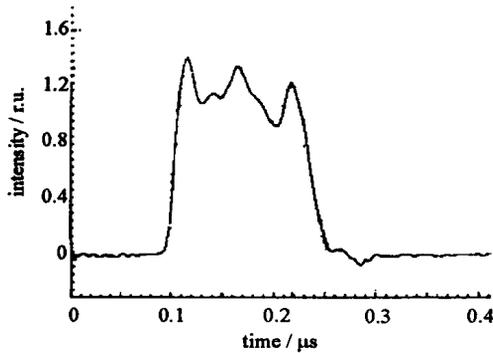


Fig. 6 Laser series to get in the preamplifier
图 6 到达预放大器的激光束序列

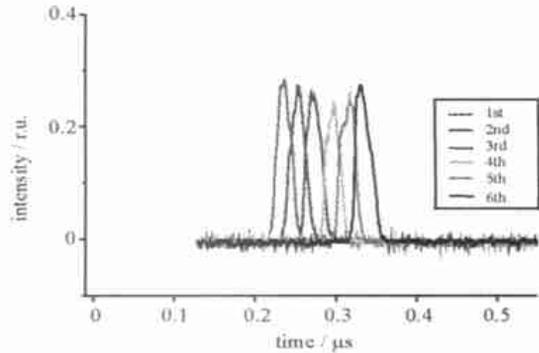


Fig. 7 Laser series to get in the main amplifier
图 7 到达主放大器的激光束序列

1.3 消延迟与聚焦

消延迟光路由置于不同位置上的平面全反镜组成。由主放大器输出的六束激光序列,经过消延迟光路后,消除了每束激光脉冲间的时间间隔,使六束激光脉冲同时到达处于同一个垂直平面内的六面球面聚焦全反镜上。

注入靶室的聚焦光路采用长焦距球面聚焦全反镜与短焦距透镜组成的复合式聚焦光路。长焦距球面聚焦全反镜为 $f = 13\text{m}$, $\phi 135\text{mm}$, 镀全反膜的 K9 玻璃,短焦距透镜为 $f = 790\text{mm}$, $\phi 135\text{mm}$, 无膜 JGS1 熔石英玻璃。两面镜子的间距为 7.5m。

这一光路不仅能减小像差的产生,而且通过球面聚焦全反镜微调,即可使时间上一致的六束激光脉冲聚焦至靶面的同一点。最终在靶上的焦斑为 $\phi 290\mu\text{m}$,靶上功率密度可达 $8 \times 10^{12}\text{W}/\text{cm}^2$ 。图 8 所示为注入靶室前六束激光的光斑。图 9 为靶面位置上六束激光聚焦后的焦斑图形。

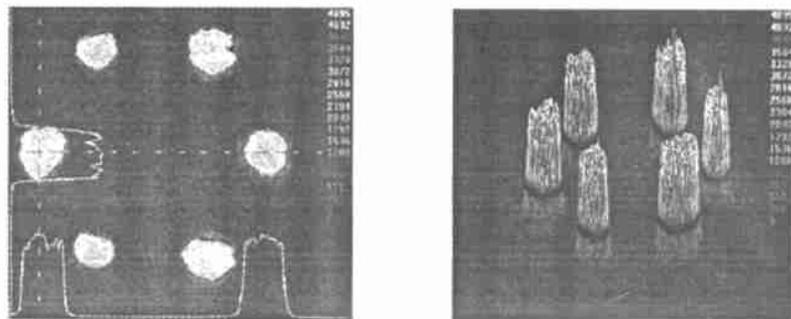


Fig. 8 Profile of the laser to focus on the target
图 8 注入靶室前六束激光的光斑

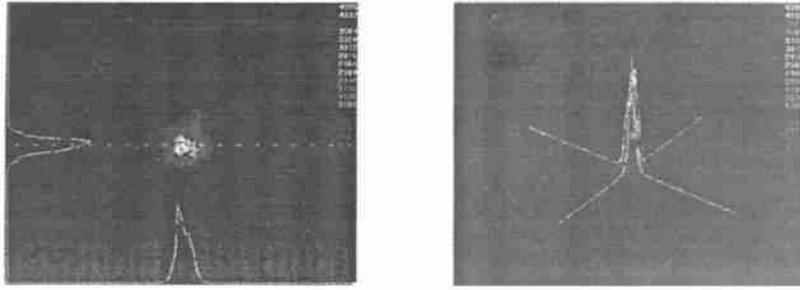


Fig. 9 Focus profile of the six laser pulses on the target

图 9 靶面位置上六束激光聚焦后的焦斑图形

1.4 光学角多路的调整

在天光一号的 MOPA 光学角多路系统中,有三处需要经常变动。它们分别是预放激光腔、主放激光腔及注入靶室的短焦距透镜与靶室之间的封窗。因此,尽快确定或找回预放激光腔和主放激光腔的主光轴及注入靶室聚焦光路中六面长焦距球面聚焦全反镜所处平面中心与靶室中心的对准是 MOPA 光学角多路调整的重点。为此,我们研制了多台可调焦激光水准仪,在上述三处位置上配置了三台,以固定其光轴的走向。

MOPA 光学角多路中的其它光学镜架,采用一台移动式可调焦激光水准仪,按预放大激光腔与主放大激光腔的中心高度为标尺,分别在上、中、下不同水平面上进行定位安装。

MOPA 光学角多路全程光路的调整,直接使用 LPX-150 输出的主振激光脉冲。

2 天光一号 MOPA 光学角多路的优化

2.1 镜片通光口径

在已经建成的 MOPA 光学角多路系统中,某些镜片的通光口径过小,不是影响光路的调整,就是造成镀膜层抗损伤能力的下降,影响镜片的使用寿命。属于前者的有预放大器输入、输出透镜,主放大器输入反射镜、主放大器输入透镜及消延迟光路上的反射镜;属于后者的有注入靶室短焦距透镜。

在优化过程中,对上述镜片的通光口径作了适当的扩大。扩大通光口径的镜片,可分为以下几类: $\phi 30\text{mm}$ 扩至 $\phi 50\text{mm}$, $\phi 50\text{mm}$ 扩至 $\phi 135\text{mm}$ 、及 $\phi 100\text{mm}$ 扩至 $\phi 120\text{mm}$ 。与此同时,对相应的镜架作了必要的改造。注入靶室的短焦距透镜由 $\phi 43\text{mm}$ 扩至 $\phi 63\text{mm}$, $f = 775\text{mm}$ 、镀双面增透膜,其目的是提高膜层的抗损伤能力。由于它的变动,长焦距球面聚焦全反镜与短焦距透镜间的间距变为 7.5m 。

2.2 镜片材料与镀膜

在建成的 MOPA 光学角多路系统中,反射镜片的材料全部都是 K9 玻璃,单面精抛光,单面镀膜。由于 K9 玻璃对 248nm 激光的吸收,造成了两方面的问题。其一,一旦镜片镀膜层由于照射光束不均匀或其它特殊原因造成局部光强增强,局部照射功率密度激增,超过膜层抗损伤阈值时,局部膜层遭到破坏,加上 K9 材料对 248nm 激光的吸收,镜片表面局部温度升高,加剧膜层的进一步破坏,造成恶性循环,破坏区域逐渐扩展,导致镜片寿命急剧下降及后续光束均匀性的破坏。其二,由于 K9 材料对 248nm 激光的吸收,阻断了光束在镜片背面的后续传输,极大地缩小与限制了光束波形及能量实时监测的空间。

经过优化后,MOPA 光学角多路系统中的反射镜片全部更改为 JGS1 熔石英材料,双面精抛光,双面镀膜(一面全反膜,另一面增透膜)。优化过程中的关键是 JGS1 熔石英毛坯的光学质量、精抛光加工中的面型精度及紫外镀膜工艺质量的监控。关于毛坯的光学质量经试验,结果表明目前使用的毛坯光学质量要比几年前的老毛坯要均匀。精抛光加工中的面型精度的要求已经从原先的不大于 $\lambda/6$ 提高到了不大于 $\lambda/10$ 。只有紫外

表 2 紫外镀膜的各种膜层的抗损伤能力

Table 2 Threshold of different UV-coating

coating type	threshold/ (J cm^{-2})
0 antireflection	1.57
0 reflection	1.30
0 optical splitting	1.12
45 reflection	1.07
45 optical splitting	1.05

镀膜工艺质量的监控还需要较大的努力。目前紫外镀膜的各种膜层的抗损伤能力,可见表 2 所示。期望今后能使紫外镀膜各类膜层的阈值在原有基础上有成倍的增长。

2.3 波形及能量的实时监测

在建成的 MOPA 光学角多路系统中,原设计没有考虑实时监测,加上反射镜材料对实时监测空间的局限,造成只有系统光路中某段,某点,某炮的零星观测,缺乏每炮的历史纪录,影响系统维护及运行质量的提高。

由于反射镜材料的更改,提供了波形、能量实施监测的条件。波形的实时监测,通过预放大器与主放大器后腔镜背面加装光电管,探测透过的剩余激光脉冲来实现。能量的实时监测,通过 MOPA 光学角多路系统光路的各反射镜背面加贴量程不同的热释电片,通过计算机巡回监测获取每一炮光路上各点能量数据及到达靶室的总能量数据。不仅可以用文件形式保留作为历史档案,也可用数显方式直观显示每炮的总能量。此项工作已经与协作单位共同确定了方案。工程完成后,将极大的提高系统的监控水平和维护运行质量。

3 天光一号 MOPA 光学角多路的展望

MOPA 光学角多路系统的建立,在高功率 ns 级 KrF 激光的光路建设与调整方面,获取了大量、可贵的经验。在该系统上如何进一步提高光束品质,更好适应物理实验需求方面,尚有大量可开发的工作。

近来,在光束平滑方面进行了一些可行性实验,尤其在采用部分非相干光的传输方面取得了若干进展,如何将此光源的光束导入现有 MOPA 光学角多路系统是一项极有意义的工作。

MOPA 光学角多路系统的进一步完善,不仅对目前高功率 ns 级 KrF 激光的物理工作是必要的,而且对天光一号装置的升级及超短脉冲 KrF 激光的放大将提供坚实的技术基础。

参考文献:

- [1] Rosocha L A, Hanlon J A, Mclead J, et al. Aorora multikilojoule KrF laser system prototype for inertial confinement fusion[J]. *Fusion Tech*, 1987, **11**:497.
- [2] Ewing J J, Hass R A, Swingle J C, et al. Optical pulse compression system for laser fusion[J]. *IEEE J*, 1978, **QE15**:368.
- [3] Owadano Y, Okuda I, Maisumoto Y, et al. Performance of the ASHURA KrF laser system and its upgrading plan[J]. *Laser and Particle Beams*, 1993, **11**(2):347—351.
- [4] Shaw M J, Bailly-Salins R, Edwards B, et al. Development of high-performance KrF and Raman laser facilities for inertial confinement fusion and other applications[J]. *Laser and Particle Beams*, 1993, **11**(2):331—346.
- [5] Obenschain S P. The Nike KrF laser facility: Performance and initial target experiments[J]. *Phys Plasmas*, 1996, **3**(5):2098.

Development of the angular multiplexing system of the MOPA in Heaven-I

GONG Kun, MA Jing-long, XIANG Yr-huai, DAI Hui, GAO Zhi-xing, SHAN Yu-sheng, WANG Nai-yan
(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-7, Beijing 102413, China)

Abstract: The angular multiplexing system is the chief part in the MOPA. It links the main oscillator, preamplifier and main amplifier up together, and acts as a laser pulse wide compressor. The angular multiplexing system can make full use of the electron energy in the cavity of preamplifier and main amplifier and the electron pulse width to amplify main-oscillator laser pulse in order to improve the power density on the target. The configuration of the angular multiplexing system of the MOPA used in Heaven I is introduced in this article. Some advices are given to make an optimization based on the its performance in these year.

Key words: MOPA; angular multiplexing system; laser amplification