

## 基于叉丝阵列的准分子激光 MOPA 系统多路光束自动准直

邵碧波, 马连英, 钱航, 王大辉, 赵学庆, 张永生, 冯刚, 易爱平

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 为了实现激光在放大器多程放大及靶面高指向精度, 介绍了高效准分子激光系统多路光束自动准直技术的研究工作。提出利用双叉丝阵列像传递光路, 分别在输入光路和输出光路上设置叉丝阵列作为近远场基准, 解决了光路中无天然准直基准及多路并行准直等问题。搭建了预放大器 II 的三路双程激光自动准直系统, 验证了该方法的可行性, 并利用成像系统和反馈控制结构实现了自动准直系统的联调实验。

**关键词:** 准分子激光; 自动准直; 近场远场; 叉丝阵列

**中图分类号:** TN248.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3507-05

## Automatic alignment of multiplexed beams of excimer laser MOPA system based on crosshair array

Shao Bibo, Ma Lianying, Qian Hang, Wang Dahui, Zhao Xueqing, Zhang Yongsheng, Feng Gang, Yi Aiping

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** In order to achieve precise multi-passes amplification on amplifiers and high pointing accuracy on target of laser beams, study on multiplexed beams automatic alignment of high efficiency excimer laser was described. Image-relaying structure with two cross-hairs, served as the near-field and the far-field references on the input beam and output beam, was proposed. In this way, the problems of nonexistence of nature alignment reference and parallel automatic alignment of multiplexed beams were solved accordingly. In the end, laser automatic alignment system of the three beams with double paths in pre-amplifier II was set up, which validated the feasibility of this method. Meanwhile, joint experiment of automatic alignment system including imaging system and feedback control structure was accomplished.

**Key words:** excimer laser; automatic alignment; near-field and far-field; crosshair array

收稿日期: 2015-04-09; 修订日期: 2015-05-08

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1106)

作者简介: 邵碧波(1962-), 女, 高级实验师, 主要从事激光技术及激光参数测量等方面的研究。Email: shaobibo@nint.ac.cn

## 0 引言

高功率准分子激光装置准直系统是指在系统常规运行中,对由前端种子光输出多束光经多级预放及主放大器,实现对放大器充分的几何填充和能量提取,并精确调节至靶面以及靶精确定位的过程<sup>[1-4]</sup>,是系统常规运行中的重要阶段,也是影响装置总体性能的重要环节之一。而由于波长限制和光路结构的特殊性,光路自动准直单元在高功率准分子激光系统中面临更多的问题需要解决。

在高功率固体激光装置中,比较成熟的光路自动准直技术是根据“两点决定一条直线”的原理,以光路上某个光学元件的几何中心和空间滤波器的滤波小孔的几何中心分别作为近场和远场基准点<sup>[5-14]</sup>,通过调整光束的偏移和指向实现光路的精确指向。固体激光装置本身拥有空间滤波器的小孔作为光路准直基准的天然优势,然而高功率准分子激光系统无需进行空间滤波,光路中不设类似固体激光装置中的滤波针孔,这也使得光路自动准直中缺少天然的远场基准。何为、陈庆浩等<sup>[7]</sup>提出以单叉丝为初始物,分别对叉丝和空间滤波器的小孔成像,作为光路的近场和远场,实现了激光核聚变装置中基于像传递激光的自动准直。但是,该方法远场同样是以空间滤波器的小孔作为远场基准。

文章针对准分子激光 MOPA (Maser Oscillator Power Amplifier) 系统多路光束特点,提出了一种基于双叉丝阵列基准的像传递光路自动准直方法,较好的解决了光路中无天然近远场基准和多路并行准直等难题,实现了系统预放大器 II 的三路双程自动准直实验验证。

## 1 技术分析

高功率准分子激光系统采用诱导空间非相干光束平滑 (Echelon Free Induced Spatial Incoherence, EFISI) 技术,实现了激光的空间域光路平滑。基本原理是采用高保真的像传递技术,设计合理的像传递光路将已经实施的部分相干光散射源的高均匀强度分布在光路中逐级传递,依次成像于各级放电泵浦或电子束泵浦放大器中间位置(傅里叶面)的共轭面处,并最终成像于靶面,从而使强度噪声的增长在原

始输入分布的像面上为零,达到了改善光束质量的目的。放大器的光束填充及能量提取取决于放大器输入/输出像传递透镜阵列参数,为了实现提高传输效率,多路光束的准直必须依赖上述两组透镜阵列,但透镜阵列作为基准的前提是透镜这列需要全口径照明,每处需要另外引入照明光源,难度较大。若紧靠透镜阵列引入插入式基准阵列,则能够解决以上问题。

目前商品化电移台已达微米级复位精度,可很好满足光路准直精度要求。对于插入式基准,可以考虑插入孔阑或十字叉丝,两者都是常用的光路调节工具。孔阑需要光源对其口径完全照明,十字叉丝只需照明交点部位,为保证准直精度,两者都需要图像采集设备上成清晰的像。相比较而言,叉丝基准容易在图像采集设备上产生更大比例图像,这是因为仅对叉丝中心照明,对光源照明质量要求相对较低,在以往的单元实验中得到了很好的证明。对于角多路 MOPA 系统,需要对每路光束建立相应的光学基准,设计成叉丝基准阵列,用于 MOPA 放大链的准直基准。此时,叉丝阵列紧贴着透镜阵列,既满足了透镜阵列的原始基准要求,也不需要准直光源对透镜全口径照明,照明叉丝阵列中心位置即可,同时消除了透镜阵列光束调整过程中引入的像差。

首先,需要对基于叉丝阵列基准的像传递光路自动准直方案进行理论研究。选择实验室现有的预放大器 II 三路双程放大光路,利用像传递系统建立近场和远场探测系统,紧靠输入光路和输出光路上的透镜阵列放置基准两叉丝阵列,计算该方法的可行性。

图 1 是系统准分子激光系统预放大器 II 的三路双程放大准直光路布局。M01~M02 为反射镜阵列, M03 为分束镜阵列, L01~L04 为透镜阵列, Cross1、Cross2 为十字叉丝阵列,其中 Cross1 和 Cross2 为电控插入式光学元件, M02 两套均为伺服反射镜。对于主激光光路,由阵列反射镜 M01 漏光获取主激光准直取样光束,经反射镜阵列 M03 分为两束,叉丝阵列基准 Cross1 和 Cross2 分别紧靠透镜阵列 L01 和 L02, Cross1 经透镜阵列 L03 成像于感光纸板 FL1 上, Cross2 经透镜阵列 L01 和 L04 成像于感光纸板 FL2 上,伺服反射镜 M02-1 和 M02-2 通过电机的调节用于光路的误差闭环反馈控制。

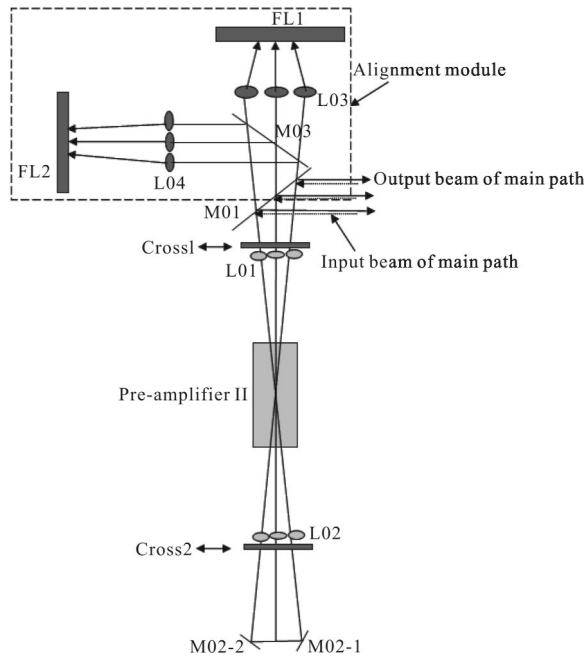


图 1 预放大器 II 的三路双程放大准直光路布局

Fig.1 Automatic alignment system of the three beams with double paths in pre-amplifier II

Cross1 通过 L03 成像于 CCD1 处, 假定 Cross1 与 L03 间的距离为  $d_1$ , L03 与 FL1 间的距离为  $d_2$ , 透镜 L03 焦距为  $f_3$ , 则有  $\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{f_3}$ , 成像横向放大率

$\beta_1 = \frac{d_2}{d_1}$ ; Cross2 通过透镜 L01 和 L04 成像于 CCD2 处, 假定 Cross2 与透镜 L01 间的距离为  $D_1$ , 透镜 L01 与 L04 间的距离为  $D_2$ , L04 与 FL2 间的距离为  $D_3$ , 透镜 L01 的焦距为  $f_1$ , 透镜 L04 焦距为  $f_4$ , 假定 Cross2 经 L01 成像像面距离 L01 为  $x$ , 则有

$\frac{1}{D_1} + \frac{1}{x} = \frac{1}{f_1}$ ,  $\frac{1}{D_2-x} + \frac{1}{D_3} = \frac{1}{f_4}$ , 得到  $x = \frac{D_1 f_1}{D_1 - f_1}$ , 成像横向

放大率  $\beta_2 = \frac{x}{D_1} \cdot \frac{D_3}{D_2-x} = \frac{D_3 f_1}{D_1 D_2 - D_1 f_1 - D_2 f_1}$ 。

假定  $\alpha$  表示反射镜 M02-1 和 M02-2 的角度调整量, 在小角度范围内, 则  $\Delta_{\text{Cross1}} \approx l_{11} \times 2\alpha$ ,  $\Delta_{\text{Cross1}} \approx l_{12} \times 2\alpha$ , 其中  $\Delta_{\text{Cross1}}$  表示叉丝 Cross1 位置处光束移动量,  $l_{11}$  表示反射镜 M02-1 与叉丝 Cross1 的距离,  $l_{12}$  表示反射镜 M02-2 与叉丝 Cross1 的距离; 同时可以得到  $\Delta_{\text{Cross2}} \approx l_{21} \times 2\alpha$ ,  $\Delta_{\text{Cross2}} \approx l_{22} \times 2\alpha$ , 其中  $\Delta_{\text{Cross2}}$  表示叉丝 Cross2 位置处光束移动量,  $l_{21}$  表示反射镜 M02-1 与叉丝 Cross2 的距离,  $l_{22}$  表示反射镜 M02-2 与叉丝 Cross2 的距离。

所以, 在反射镜 M1 或者 M2 的角度调整  $\alpha$  时, CCD1 处光束偏移量为:  $\Delta_{\text{CCD1}} \approx l_{11} \times 2\alpha \times \beta_1$ ,  $\Delta_{\text{CCD1}} \approx l_{12} \times 2\alpha \times \beta_1$ ; CCD2 处光束偏移量为:  $\Delta_{\text{CCD2}} \approx l_{21} \times 2\alpha \times \beta_2$ ,  $\Delta_{\text{CCD2}} \approx l_{22} \times 2\alpha \times \beta_2$ 。公式可以看出, 在小角度范围内将角度分为左右、俯仰的调整, 分别对应光斑在 CCD 上 X、Y 方向线性移动, 说明光路准直系统是一个线性系统, 通过步进电机的逐步逼近即可实现光路的准直。

## 2 实验验证

进行了放大器 II 的三路双程光路准直实验。放大器准直基准由放大器前后两插入式叉丝阵列基准确定, 两叉丝阵列中心连线确定了光束在放大器中的传输路径。叉丝阵列空间排布与其紧靠透镜阵列相同, 实物如图 2 所示。为了满足叉丝阵列硬度及边缘平整度需求, 减小因叉丝硬度不够导致位置变化或因边缘毛刺过多导致成像不清晰, 叉丝材料采用了线切割不锈钢结构; 根据阵列成像缩比率及 CCD 空间分辨率, 设计叉丝阵列宽度为 2 mm。

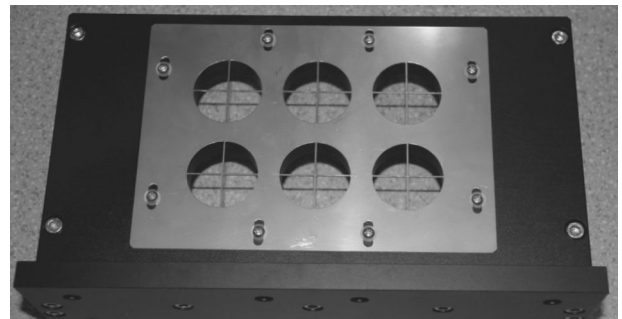


图 2 设计的预放大器 II 叉丝阵列

Fig.2 Designed crosshair array of pre-amplifier II

预放大器 II 准直根据基准定位与采集、偏差光路自动准直和准直精度分析两个步骤来实施。

### ① 基准定位与采集

放大器光路的叉丝阵列基准, 应在光路中需要高度稳定。为不影响光路布局, 采用插入式的方法引入十字叉丝, 通过步进电移台带动十字叉丝阵列实现插入退出, 电移台行程 50 cm, 重复定位精度  $< 5 \mu\text{m}$ , 直线度高低起伏  $\pm 15 \mu\text{m}$ , 偏摆量  $\pm 7.5 \mu\text{m}$ 。

在进行基准定位时, 首先通过调节 M01 反射镜阵列上端三个镜片和入射到 M01 上的三个反射镜, 使氦镉激光按照预定路径通过放大器, 以像传递透

镜阵列 L01 和 L02 镜片作为基准,使光束通过其中心;其次插入 Cross1,使光束正好通过 Cross1 中心位置,布置叉丝阵列像测量光路和准直精度测量光路。将 L01 细调定位,微调感光板 1 对 Cross1 清晰成像,放置 CCD1 并调节其视场和焦距,使其对感光板 1 上的图像清晰成像,这样就完成了 Cross1 的定位及采集,Cross2、感光板 2 及 CCD2 的调试与之类似,不再赘述。

叉丝基准定位后,用各自测量 CCD 采集到的叉丝阵列像如图 3 所示。通过图像计算,得到 Cross1、Cross2 中心坐标。

为验证基准叉丝的重复定位精度,反复五次退出和插入两基准叉丝,用 CCD1 和 CCD2 记录,叉丝阵列中心最大偏移为 1 个像素,证明该重复插入机构的复位精度满足使用要求。

#### ② 偏差光路自动准直和准直精度分析

移出基准叉丝阵列,调偏光路,插入叉丝阵列,

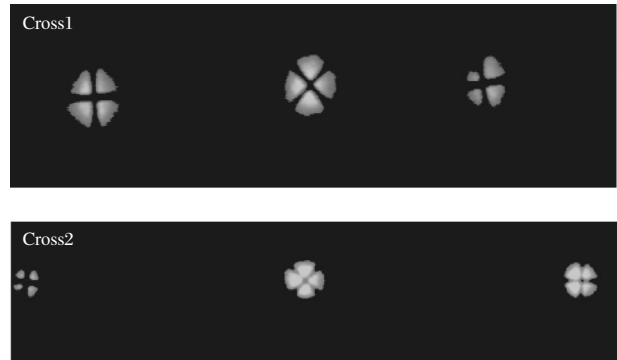


图 3 叉丝阵列基准像采集结果

Fig.3 Images of crosshair array references

记下 Cross1、Cross2 在 CCD1 和 CCD2 成像的中心坐标,并作为新的准直基准。移出 Cross1 和 Cross2,采集测量准直光束图像,根据偏离光束坐标与基准坐标差值,通过调节伺服反射镜 M02-1 和 M02-2,形成闭环控制,实现偏差光束复位,相应测量结果如表 1 所示。

表 1 偏离光路准直实验结果

Tab.1 Test results of departure path using automatic alignment

Serial number	Cross coordinate		Deviated beam coordinate		D-value after alignment	
	CCD1	CCD2	CCD1	CCD2	CCD1	CCD2
First path	(116, 274)	(650, 303)	(125, 280)	(659, 312)	(0.67, -0.083)	(0.23, 0.36)
	(116, 274)	(650, 303)	(106, 266)	(640, 300)	(-0.16, -0.94)	(0.67, -0.53)
Second path	(389, 279)	(381, 296)	(370, 276)	(366, 300)	(0.06, -0.16)	(-0.05, 0.19)
	(389, 279)	(381, 296)	(395, 276)	(390, 286)	(-0.23, 0.39)	(-0.18, -0.53)
Third path	(632, 281)	(121, 307)	(630, 289)	(126, 310)	(-0.50, -0.20)	(-0.12, -0.16)
	(632, 281)	(121, 307)	(621, 277)	(126, 301)	(0.15, 0.092)	(-0.077, -0.09)

由表 1 知,CCD1 测量的三路光束准直最大偏差发生在 y 方向,差值为 0.94 个像素,CCD2 测量的三路光束准直最大偏差发生在 x 方向,差值为 0.67 个像素。又根据自动准直系统近远场成像设计,CCD1 与 Cross1 的成像缩比率为 60,CCD2 与 Cross2 的成像缩比率为 157.6,所以转换到 Cross1 处最大偏差为  $0.94 \times 6.25 \times 60 = 352.50 \mu\text{m}$ ,转换到 Cross1 处最大偏差为  $0.67 \times 6.25 \times 157.6 = 659.95 \mu\text{m}$ 。预放大器 II 光束传输口径最大为 20 mm,两者最大准直偏差为光束口径的 4.6%,完全可以满足角多路光束传输要求。

### 3 结论

针对高功率准分子激光 MOPA 系统特点,完成

了多路激光自动准直系统近远场基准技术研究。提出了采用双叉丝阵列和像传递相结合,完成了自动准直系统近远场光路基准定位。通过在输入光路和输出光路上设置叉丝阵列作为近远场基准,在预放大器 II 的三路激光进行了自动准直实验验证,结果表明选取的叉丝阵列成像清晰,后期图像处理较为容易。该方法既解决了准分子激光系统无空间滤波器这一远场基准的难题,又实现了多路激光基准的同步成像与采样,实现了自动准直系统的智能化和高效化集成。

#### 参考文献:

- [1] Liu Daizhong, Xu Renfang, Fan Dianyuan. Design and

- performance of a video-based laser beam automation alignment system[J]. *Chin Opt Lett*, 2004, 2(2): 92-94.
- [2] Eaton D J, Gayhart A R. High speed pointing control system [C]//SPIE, 1992, 1697: 251-260.
- [3] Kroha H. Laser-alignment system with transparent silicon strip sensors and its application[J]. *Nuclear Physics B*, 1997, 53(3S): 80-85.
- [4] Boege S J, Bliss E S, Choccol C J, et al. NIF pointing and centering systems and target using a 351nm laser source[C]//SPIE, 1997, 3047: 248-258.
- [5] Pan Gaofeng, Zhang Jingxu, Chen Juan. Common path auto-alignment system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(10): 1500-1502. (in Chinese)  
潘高峰, 张景旭, 陈娟. 一种共光路自动对准系统[J]. 中国激光, 2008, 35(10): 1500-1502.
- [6] Liu Daizhong, Zhu Jianqiang, Xu Renfang, et al. Study of beams automatic alignment in four-pass amplifiers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(5): 582-586. (in Chinese)  
刘代中, 朱健强, 徐仁芳, 等. 4程放大光路自动准直系统研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(5): 582-586.
- [7] He Wei, Xu Qinghao, Xu Renfang, et al. Image transfer based automatic laser alignment technique for laser-fusion facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(9): 1279-1283. (in Chinese)  
何为, 徐庆浩, 徐仁芳, 等. 激光核聚变装置中基于像传递的激光自动准直技术研究 [J]. 光学学报, 1999, 19(9): 1279-1283.
- [8] Bai Zhanwei, Xie Zhijiang, Yuan Xiaodong. Research on critical technology of 4x1 collimated light arrays[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2010, 5(10): 10-14. (in Chinese)  
柏占伟, 谢志江, 袁晓东. 阵列 4x1 准直光源关键技术研究[J]. 现代科学仪器, 2010, 5(10): 10-14.
- [9] Yang Zhen, Li Guangyun, He Lei. Measurement methods and precision analysis of optical collimation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 282-286. (in Chinese)  
杨振, 李广云, 贺磊. 光学准直测量方法与精度分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 282-286.
- [10] Cao Jun, Song Wenlong. Developing of a laser beam alignment system based on parameters self-adaptive PID control algorithm [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2003, 14(12): 1328-1343. (in Chinese)  
曹军, 宋文龙. 基于参数自适应 PID 控制算法激光准直系统的研制[J]. 光电子·激光, 2003, 14(12): 1328-1343.
- [11] Wang Guofu, Chen Liangyi, He Junhua. Design of SG-III 3 $\omega$  laser beam auto-collimation system[J]. *Science Technology and Engineering*, 2007, 7(7): 1355-1358. (in Chinese)  
王国富, 陈良益, 何俊华. 神光-III 3 $\omega$  光路自动准直系统设计[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(7): 1355-1358.
- [12] Liu Daizhong, Lu Fengnian, Cao Jinzhou, et al. Design and application of a laser beam alignment system based on the imaging properties of a multi-pass amplifier[J]. *Chin Opt Lett*, 2006, 4(10): 601-604.
- [13] Bliss E S, Feldman M, Vann C S, et al. Laser chain alignment with low power local light sources [C]//SPIE, 1995, 2633: 760-767.
- [14] Gao Yanqi, Zhu Baoqiang, Liu Daizhong, et al. Far field auto-alignment system used in SG-II-Up system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(6): 065204-1-065204-6. (in Chinese)  
高妍琦, 朱宝强, 刘代中, 等. 神光 II 升级装置远场准直系统研究[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 065204-1-065204-6.