

高功率准分子激光 MOPA 系统中的三路激光 准直技术研究

钱 航 王大辉 马连英 张永生 赵学庆 朱永祥 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 光束自动准直是大型激光装置中的重要组成部分。以准分子(XeCl)激光主振荡功率放大(MOPA)系统中一个典型的像传递单元为例,着重介绍了准直基准的建立、3路激光自动准直的原理、电荷耦合元件(CCD)图像采集与分析处理。通过实验验证,该准直单元准直效率高,准直精度能够满足 MOPA 系统的光束准直要求。

关键词 激光器; 主振荡功率放大; 3路自动准直

中图分类号 TN606 文献标志码 A doi: 10.3788/LOP51.101403

Research on 3-Ray Automatic Alignment in High Power Excimer Laser MOPA System

Qian Hang Wang Dahui Ma Lianying Zhang Yongsheng Zhao Xueqing
Zhu Yongxiang Yi Aiping

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

Abstract Automatic alignment of laser beam is an important part of the large laser device. Taking classical image-relaying unit in an excimer (XeCl) laser master oscillator power-amplifier (MOPA) system as an example, the establishment of alignment benchmark, the automatic alignment principle of 3-ray and charge-coupled device (CCD) image acquisition and processing method are introduced. It has been proved by the experiment results that this alignment unit can appease the request of laser automatic alignment of MOPA system.

Key words lasers; master oscillator power-amplifier; 3-ray automatic alignment

OCIS codes 140.2180; 100.2000; 150.0155

1 引 言

准分子激光可实现高功率输出,同时还具有波长短、光束均匀性好等特点,这使得高功率准分子激光成为直接驱动惯性约束聚变物理和聚变能源关键技术研究的重要工具之一。在高功率准分子(XeCl)激光主振荡功率放大(MOPA)系统中,为了实现对靶目标的均匀照明,系统采用了角多路技术、编码/解码和像传递技术,这些技术的应用使得系统整体光路结构复杂、庞大,最长光程达二百余米,光学元件数量上百个。为了确保振荡器输出的激光能够稳定、精准地穿过预放大器和主放大器,并精确地聚焦到靶面上,必须配置高精度的光束自动准直系统。光束自动准直系统能保证准分子激光系统高效稳定运行,已成为大型激光装置必不可少的重要组成部分^[1-4]。

现有的 308 nm 准分子(XeCl)激光 MOPA 系统包含 1 台振荡器和 5 台放电抽运/电子束抽运激光放大器,整体光路由多个角多路放大结构和像传递光路组成。角多路结构的设计充分依据 5 台激光放大器增益区的实际大小并参考激光放大器的安装位置,以期获得最大增益区填充比并最大限度地提取增益区中的能量。

收稿日期: 2014-03-28; 收到修改稿日期: 2014-05-20; 网络出版日期: 2014-08-25

作者简介: 钱 航(1981—),男,工程师,主要从事激光器技术及自动控制等方面的研究。

E-mail: bingtongst@163.com

像传递系统采用了 $4f$ 成像结构、无限长显微成像结构和单透镜成像结构三种像传递方式。对于高功率准分子激光MOPA系统,靶面总指向稳定性精度要求为 $30\ \mu\text{m}$,通过合理的误差分配,系统总准直精度要求为 $16.43\ \mu\text{m}$ 。影响准直系统总精度要求的影响因子包含前端主激光与准直激光的耦合精度、光路传输过程中准直激光由于色差(波长不同)产生的光路偏差及靶面准直精度,此时对准直精度要求较高。而对于传输过程中的各级放大器的准直精度要求,则与放大器的口径、各路激光光束的口径及空间排布有关系,最终要求准直激光在窗口处的准直精度小于窗口尺寸的1%。

本文以准分子激光系统预放大器II的3路激光像传递单元为例,着重介绍了自动准直的原理、准直基准的建立、电荷耦合元件(CCD)图像采集与分析处理等。

2 三路激光准直技术

2.1 准直光源的选取

高功率准分子(XeCl)激光MOPA系统中前端振荡器输出的激光为部分相干光,能量很低,约为 $8\ \text{mJ}$,长程传输后能量出现衰减,不能兼作准直光源使用,需另外引入准直光源。

准直光源应与主激光源具有相同的波长和光束质量,即同波长和同波面,这样才可以实现准直光源与主激光折射后仍保持同轴传输,并具有相同的像面。所以为了避免在斜入射折射光学元件上激光波长差异导致的色差,光路的准直光源选用输出波长与 $308\ \text{nm}$ 主激光相近的He-Cd激光器,其输出激光波长为 $325\ \text{nm}$,这种情况下,虽然两者在光路传输中存在色差,但由于两者波长差较小,使得光路偏差较小。主激光初始物口径为 $\Phi\ 3\ \text{mm}$,发散角为 $5\ \text{mrad}$,指向稳定性小于 $1\ \mu\text{rad}$,相干长度为 $0.8\ \text{mm}$;准直激光系统输出激光光斑尺寸为 $1\ \text{mm}$,激光发散角小于 $1\ \text{mrad}$,指向稳定性小于 $1\ \mu\text{rad}$,相干长度较长。但由于准直的目的在于光轴的指向性调整,基于两激光的光斑重心坐标进行调节,所以两者在相干度方面差别影响不是很大。

2.2 三路激光准直的基本原理

激光系统中的光束自动准直依据“两点决定一条直线”原理进行,在光路中选定近场、远场基准点,并以此来调节反射镜恢复原光路。光束自动准直中的基准点选择非常重要,直接影响到准直精度。在固体激光装置中,可以容易地选用光路上某个光学元件和空间滤波器小孔的几何中心分别作为近场、远场基准点。而在准分子激光系统中不进行空间滤波,缺乏可以直接利用的准直基准^[5-7]。

3路激光准直具体应用于准分子激光系统中的第2台激光放大器(AMP2)中。根据光学设计方案,前端振荡器输出的1束激光经过一次编码到达AMP2中已经成为3束激光,在AMP2中经过增益区的双程放大和 $4f$ 像传递透镜后继续传输至AMP3,如图1所示。AMP2前后端各有1组透镜阵列(包含3个透镜)L01/L02和反射镜阵列(包含上下各3个反射镜)M01/M02,L01/L02构成了 $4f$ 像传递结构,M01用于激光的导入和导出,M02用于提升光束。

根据角多路设计原则,放大器的光束填充及能量提取取决于放大器输入/输出耦合透镜阵列参数,应该选用透镜阵列作为准直基准,但透镜作为基准对照明准直光源提出较高的要求,需要对透镜全口径照明,难以实现。为了解决这个问题,可以在紧靠透镜阵列L01/L02处人为引入插入式十字叉丝作为基准,如图1所示,输入光束基准CR1作为“近场点”,输出光束基准CR2作为“远场点”。由M01漏光获取主激光准直取光光束,在M01后搭建准直单元,准直单元由两组透镜L03/L04、分束片阵列M03、两个感光板FL1/FL2和两个电荷耦合元件CCD1/CCD2组成。通过手动调节,CR1/CR2的几何中心分别与L01/L02几何中心完全重合,选择适当焦距的L03/L04,使用准直激光照明CR1/CR2,通过移入CR1,移出CR2,使CR1通过L01/L04、FL2成像于CCD2上;通过移入CR2,移出CR1,使CR2通过L02/L03、FL1成像于CCD1上。通过图像采集与分析处理软件计算并保存CR1/CR2的几何中心坐标,即为准直基准坐标。

在准直基准坐标确定之后,将CR1/CR2全部移出,调节M01/M02,直至准直激光的光斑中心与基准坐标的误差小于要求的精度即完成准直。

两个十字叉丝CR1/CR2置于电动平移台上,该平移台的重复定位精度达到 $5\ \mu\text{m}$,可以满足准直精度(CCD上一个像素,约 $10\ \mu\text{m}$)要求。

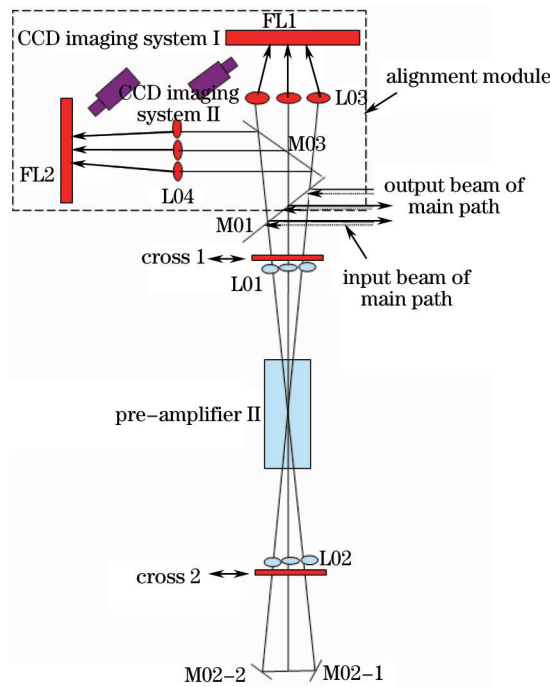


图1 三路自动准直光路

Fig.1 Automatic alignment system of the three beams

2.3 3路激光准直的自动控制实现

通过上述介绍,3路激光的准直在原理上完全一致,可以同步进行。对于每一路激光而言,都由 M01/M02 中的两个独立反射镜控制光束的指向,反射镜均带有步进电机以便实现自动控制。3路激光的准直按照图2所示的流程图进行。在正常情况下,激光准直仅涉及对反射镜的小角度调节,这样,反射镜的调节量与激光光斑在 CCD 上的位移量近似成正比关系。此时,准直工作完全可以按照文献[8]中的方法进行,在实际光路中测出3路激光对应的共计24个位移系数,分别输入自动控制软件中。图3为3路激光自动控制软件界面。

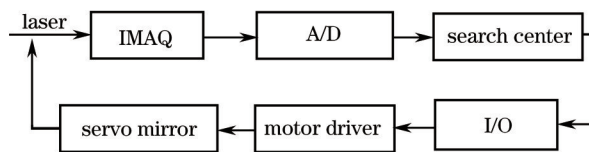


图2 光束自动准直流程

Fig.2 Flow chart of laser automatic alignment software

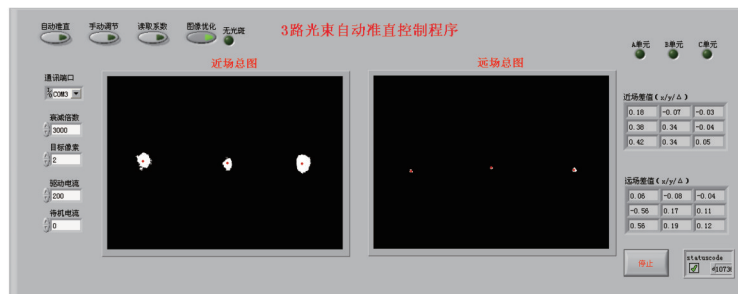


图3 激光自动控制软件界面

Fig.3 Work interface of laser automatic alignment software

2.4 CCD 图像的采集与处理

叉丝阵列分别成像于近远场感光板 FL1/FL2,近远场 CCD1/ CCD2 对其拍摄成像,由专用软件进行图像处理。由于多路光束近远场像面都在一幅图片上,需要对图片进行区域分割,利用区域计算方法,通过矩形框自由限定计算的区域。对于叉丝阵列的图像处理,位置坐标根据其形心确定,同时对图像进行骨架处理,

即利用 CCD 采集图像的像素亮度值确定图像边缘,由拟合法确定十字叉丝轮廓,根据轮廓得到每个叉丝的位置坐标;对于成像光斑的图像处理,采用全屏求重心法计算其位置坐标,即以整个屏幕为计算范围,计算得到光束的重心位置,并以此位置坐标与参考位置比较,这样不管光束具体形状如何,只要光束分布比较规则、对称,就能准确地给出光束的位置,即使部分光束偏出 CCD 范围时,仍能进行准确调节,从而保证了自动准直的调节范围只受限于 CCD 的视场大小^[9-12]。

3 3路激光准直技术单元实验结果

首先,选择聚四氟乙烯板、感光纸及紫外荧光板3种像面接收材料,利用实验室现有的普通 CCD,分别针对不同功率的 He-Cd 准直激光进行图像采集对比。三者相比,同样条件下感光纸荧光成像效果好。图 4、图 5 分别为 3 路准直激光近场远场成像图。

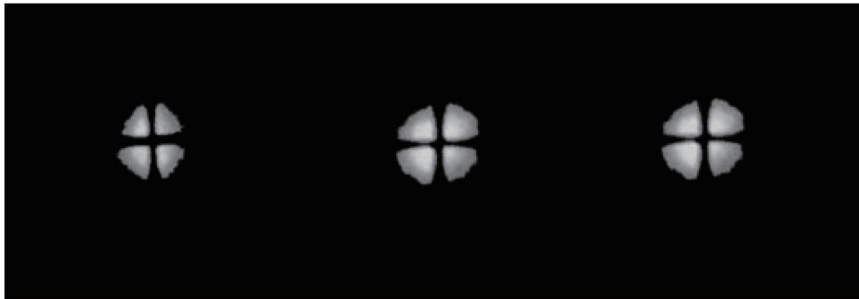


图 4 3路准直激光近场成像图

Fig.4 Near-field image of three beams in automatic alignment system

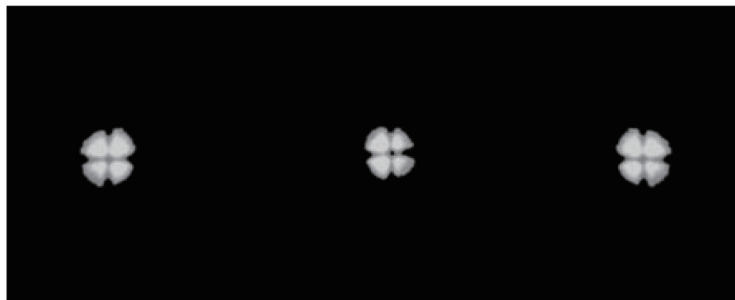


图 5 3路准直激光远场成像图

Fig.5 Far-field image of three beams in automatic alignment system

实验中,将基准叉丝阵列移出,手动调偏光路,随后插入叉丝阵列,重新采集叉丝像作为自动准直基准,记下 CR1/CR2 在 CCD1/CCD2 成像的中心坐标,并作为新的准直基准。然后,移出 CR1/CR2,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 M01/ M02,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

Table 1 Test results of departure path using automatic alignment

Order number	Cross reference coordinates		Offset beam coordinates		Collimated difference	
	CCD1	CCD2	CCD1	CCD2	CCD1	CCD2
First	(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	(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	(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 可知,3 路光束 CCD1 测量的光束准直最大偏差发生在 x 方向,差值为 0.67 pixel, CCD2 测量的光束准直最大偏差发生在 y 方向,差值为 0.94 pixel。设定准直误差在 1 pixel 之内时,同时调偏 3 束激光后闭

环反馈准直时间为40 s左右。

4 结 论

针对高功率准分子激光MOPA系统中一个典型的像传递单元,设计了一种新型光路自动准直单元,使用十字叉丝作为准直基准,采用感光板与CCD相机组合进行图像采集,实现了3路激光的同步自动准直。通过实验验证,该自动准直系统结构紧凑,准直效率高,准直精度达到系统要求,目前已经成功应用于高功率准分子激光MOPA系统的光束自动准直系统中。

参 考 文 献

- 1 Daizhong Liu, Renfang Xu, Dianyuan Fan. Design and performance of a video-based laser beam automatic alignment system[J]. Chin Opt Lett, 2004, 2(2): 92-94.
- 2 D J Eaton, A R Gayhart. High speed pointing control system[C]. SPIE, 1992, 1697: 251-260.
- 3 H Kroha. Laser-alignment system with transparent silicon strip sensors and its application[J]. Nuclear Physics B, 1997, 53(3)(suppl): 80-85.
- 4 Pan Gaofeng, Zhang Jingxu, Chen Juan. Common path auto-alignment system[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(10): 1500-1504.
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): 1500-1504.
- 5 Ma Lianying, Qian Hang, An Xiaoxia, *et al.*. A new control algorithm of beam automatic alignment[J]. Laser Journal, 2013, 34(5): 14-15.
马连英, 钱航, 安晓霞, 等. 光路自动准直中的全自动化控制算法[J]. 激光杂志, 2013, 34(5): 14-15.
- 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.
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 Liu Daizhong, Xu Renfang, Fan Dianyuan. Evolution of beam automatic alignment system in laser-fusion facility[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(2): 1-5.
刘代中, 徐仁芳, 范滇元. 激光聚变装置光束自动准直系统的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(2): 1-5.
- 8 S J Boege, E S Bliss, C J Choco, *et al.*. NIF pointing and centering systems and target using a 351 nm laser source[C]. SPIE, 1997, 3047: 248-258.
- 9 He Wei, Chen 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.
何 为, 陈庆浩, 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.
- 10 Lü Fengnian, Liu Daizhong, Xu Renfang, *et al.*. Performance of image processing in beams automatic alignment system [J]. Optical Technique, 2005, 31(3): 335-337.
吕凤年, 刘代中, 徐仁芳, 等. 图像处理在光路自动准直系统中的应用[J]. 光学技术, 2005, 31(3): 335-337.
- 11 Hua Hengqi, Zhao Xueqing, Xue Quanxi, *et al.*. Optical automatic alignment on amplification experiment of double ultraviolet laser pulse[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(s): 167-171.
华恒祺, 赵学庆, 薛全喜, 等. 紫外激光双脉冲串放大实验中的光路自动准直[J]. 中国激光, 2010, 37(s): 167-171.
- 12 Kong Bing, Wang Zhao, Tan Yushan. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting[J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(3): 275-279.
孔 冰, 王 昭, 谭玉山. 基于圆拟合的激光光斑中心检测算法[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(3): 275-279.