

文章编号 1004-924X(2015)04-0949-07

基于荧光成像的准分子激光系统 多路光束自动准直

王大辉*, 钱航, 赵学庆, 马连英, 张永生, 邵碧波, 冯刚, 易爱平, 赵军
(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:研究了基于准直光束成像的准分子激光主振荡功率放大(MOPA)系统的多路光束自动准直,实现了激光在放大器中的多程放大及高的靶面指向精度。采用 352 nm He-Cd 激光作为准直光源,提出了多光束感光屏同步接收与可见光 CCD 荧光成像相结合的复合图像采集技术,解决了自动准直系统多路激光的近场、远场图像获取问题。利用图像区域分割处理方法编制了准直信息处理软件,实现了对多光束的自动准直闭环反馈控制。最后,结合准分子激光 MOPA 系统中的预放大器光学设计进行了自动准直验证实验。结果表明:准直成像光强可调谐倍数为 300,成像系统在放大器窗口处固有误差占放大器口径比例小于设计值 1.08%,3 路激光的自动准直时间为 40 s,完全满足放大器的几何填充和能量提取要求。

关键词:准分子激光;主振荡功率放大器;光束准直;自动准直;荧光成像;区域分割;可调谐放大

中图分类号:TN248.2;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152304.0949

Automatic alignment of multiplexed beams of excimer laser system based on fluorescence imaging

WANG Da-hui*, QIAN Hang, ZHAO Xue-qing, MA Lian-ying, ZHANG Yong-sheng,
SHAO Bi-bo, FENG Gang, YI Ai-ping, ZHAO Jun

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

* Corresponding author, E-mail: wangdahui@nint.ac.cn

Abstract: The multiplexed beam automatic alignment of a Master Oscillator Power Amplifier(MOPA) system in a high power excimer laser based on scattering imaging was explored to achieve the multi-pass amplifications of amplifiers and high pointing accuracy of a target. A 325 nm He-Cd laser was selected as an automatic alignment source in the whole optical path. Then a complex imaging collection system was proposed by combining the photosensitive paper synchronized reception and a CCD visible imaging to complete the near-field and far-field scattering imaging in the automatic alignment system. Meanwhile, the information processing software was compiled based on the image region segmentation to accomplish the closed loop feedback control for automatic alignment of several array beams. Finally, image collection validation experiments for pre-amplifier beam automatic alignment were carried

收稿日期:2014-08-08;修订日期:2014-10-08.

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室科研基金资助项目(No. SKLLIM1408)

out. The results indicate that the light intensity tunable multiple value of the scattering imaging system is 300, the ratio of the error of automatic alignment beams on the amplifier windows and the window diameters is lower than the designed value by 1.08% and the total time of automatic alignment of the three beams is 40 s, which satisfies the demands of the amplifier for geometric fill and energy extraction.

Key words: excimer laser; Master Oscillator Power Amplifier(MOPA); beam alignment; automatic alignment; fluorescence imaging; region segmentation; tunable amplification

1 引言

高功率准分子激光角多路主振荡功率放大器(Master Oscillator Power Amplifier, MOPA)的光束传输光学元件数量多、光程长,而温度变化、地基及支撑架的微振动、反射镜机械结构蠕变、气流扰动及光学元件的加工和安装误差等均会使反射镜位置和倾斜角产生偏移,从而造成很大的光束偏移。为此,需要设计一套集成图像采集和准直控制的光路自动准直系统,以保证放大器处光束按照预定方向传输,从而实现对放大器充分的几何填充和能量提取^[1-8];并使多路光束稳定精确地照射到靶面上,避免各路间发生串扰,甚至产生靶前预脉冲。

光路自动准直是一个闭环控制系统,图像传感器为信息采集设备,电动反射镜为执行器件,计算机为控制硬件,输入误差量为光斑与基准重心偏差,输出控制量为步进电机的驱动步数,输入量与输出量之间的联系为控制算法。光路自动准直的一个核心技术是图像获取,目前常用的图像采集设备有光电耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)、四象限光电探测器及二维位置敏感探测器(Position Sensitive Detector, PSD)等^[9-10]。准分子激光 MOPA 系统为含多台放大器的多程放大结构,其多路光束相互间距远大于光斑尺度,而探测器受限于自身的光敏面尺寸,难以将多路激光完全成像于单个探测器上,因此成像时一般需要多个探测器。对角多路 MOPA 放大链准直所需的 CCD 数量通常为光束路数的两倍。由于准直光处于紫外波段,而紫外 CCD 价格昂贵,工程实现成本将大幅增加。因此对于多路激光光束自动准直近远场图像的同时采集,国内外大多采用阵列 CCD 或者大口径光敏探测器,在处理上采用多线程技术对多路激光光束进行并行处理,即将自动准直的多个线程

分配给多个计算机。然而该方法也需要多个图像采集设备及相配套的图像采集卡,整体准直效率虽然有所提高,但准直成本并无改善^[11-13]。

基于准分子激光 MOPA 系统角多路的特点,本文提出了一种复合成像获取方法。利用一块感光屏同步接收多光束照射,利用可见光 CCD 一次记录多光束产生的荧光成像,实现了准直光路近场、远场基准及光斑的采集,通过图像区域分割处理及后期的闭环反馈控制,完成了准分子激光 MOPA 系统中预放大器 II 的三路激光自动准直原理性实验。

2 技术分析

2.1 预放大器 II 的三路准直成像光路设计

准直系统通常利用主光路上反射镜漏光或透镜反射光完成^[14]。基于荧光成像方法,利用反射镜漏光将多路光束引出,在像面放置合适口径的感光屏,准直激光照射到感光屏上产生荧光,在近场、远场分别设计 CCD 成像系统,可以同时记录多路光束或者叉丝阵列的基准像。针对预放大器 II 的三路双程放大主光路,搭建了基于荧光成像的准直光路,如图 1 所示。准直光源由阵列反射镜 M_1 漏光获取主激光准直取样光束,经反射镜阵列 M_3 分为两束,叉丝阵列基准 $Cross_1$ 和 $Cross_2$ 分别紧靠透镜阵列 L_1 和 L_2 。 $Cross_1$ 经透镜阵列 L_3 成像于感光屏 FL_1 上,利用 CCD 成像系统 1 对 FL_1 进行荧光成像。 $Cross_2$ 经透镜阵列 L_1 和 L_4 成像于感光屏 FL_2 上,利用 CCD 成像系统 2 对 FL_2 进行荧光成像。反射镜 M_2 为步进电机驱动镜架,与透镜阵列结构类似。

在这种情况下,每个放大器准直只需要 2 个感光屏、2 套可见光 CCD 摄像系统、1 块图像采集卡及 1 台计算机即可实现准直功能,大大降低了准直成本。

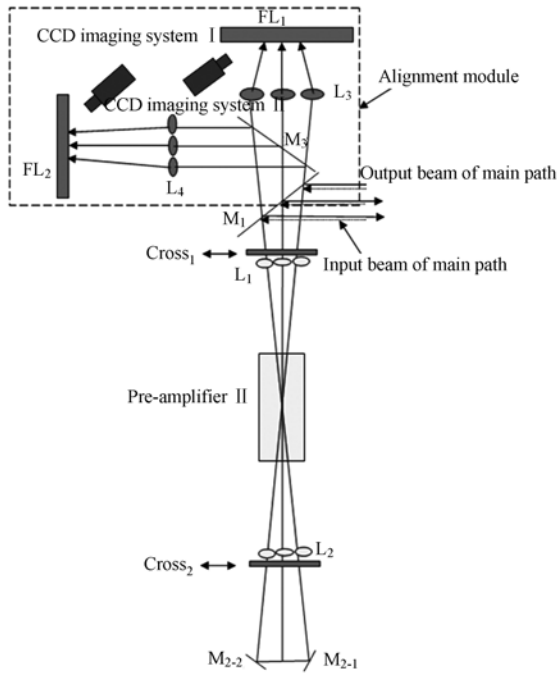


图 1 预放大器 II 的三路双程放大准直光路布局

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

2.2 精度分析

利用两个叉丝阵列作为定位基准进行自动准直, r 表示叉丝阵列处的光束半径, n 为 CCD 相机采样光斑水平或者竖直方向上的像素数, d 表示成像系统的物方分辨率, 可以得到:

$$d = \frac{2r}{n} = 2r / \left(\frac{S}{p} \right) = \frac{p}{\beta}, \quad (1)$$

其中: S 为 CCD 相机采样光斑水平或者竖直方向上的尺寸, p 为 CCD 单个像素的尺寸 ($6.25 \mu\text{m}$), β 为 CCD 近场、远场成像系统的放大率。 p 为固定值, β 根据成像系统设计而定。对于近场、远场双叉丝组合准直系统, 在两叉丝处光束均为随机分布, 相应光束的最大相对误差为两分辨率之和, 准直精度定义为:

$$\theta = (d_1 + d_2) / L, \quad (2)$$

其中: θ 为光路布局的角度误差, d_1, d_2 分别为近场、远场叉丝的分辨率, L 为两叉丝间距离。显然, 两个叉丝阵列的间距越长, 准直精度越高。

在准直光路中, Cross_1 与 L_3 的距离为 1500 mm , L_3 焦距为 375 mm , L_3 与感光屏 FL_1 的距离为 500 mm , 此时成像系统的放大率为 $1/3$; Cross_2 与 L_1 的距离为 5940 mm , M_3 距离 L_1 1500 mm , 感光屏 FL_2 距离透镜 L_4 500 mm , L_4

距离分光镜 M_3 500 mm , 透镜阵列 L_4 的焦距为 573 mm , 此时成像系统的放大率为 $1/7.88$ 。 $\text{CCD}_1, \text{CCD}_2$ 成像系统的放大率均为 $1/20$, 则 $\text{Cross}_1, \text{Cross}_2$ 成像系统的总体放大率分别为 $1/60, 1/158$ 。 CCD 本身的分辨率为 1 pixel , 得到 Cross_1 物方分辨率为 60 pixel , Cross_2 物方分辨率为 158 pixel 。采用敏通公司的 CCD 采集光束, 单元像素尺寸为 $6.25 \mu\text{m}$, 此时相应的物方分辨率分别为 $375 \mu\text{m}$ 和 $987 \mu\text{m}$ 。两叉丝阵列实际距离 5940 mm , 则准直系统精度为 $\theta \approx \frac{d}{L} = \frac{1362 \mu\text{m}}{5.4 \text{ m}} \approx 229 \mu\text{rad}$ 。

预放大器 II 前、后窗口与 $\text{Cross}_1, \text{Cross}_2$ 的距离均为 2500 mm , 所以两者最大偏差为 $229 \mu\text{rad} \times (5940 - 5000) \text{ mm} = 215.2 \mu\text{m}$ 。设计预放大器 II 的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 1.08% , 完全可以满足角多路光束的传输要求。

3 实验验证

3.1 准直软件编写

根据自动准直原理、近场/远场图像处理及闭环反馈算法, 编写了预放大器 II 自动准直软件, 软件界面如图 2 所示。

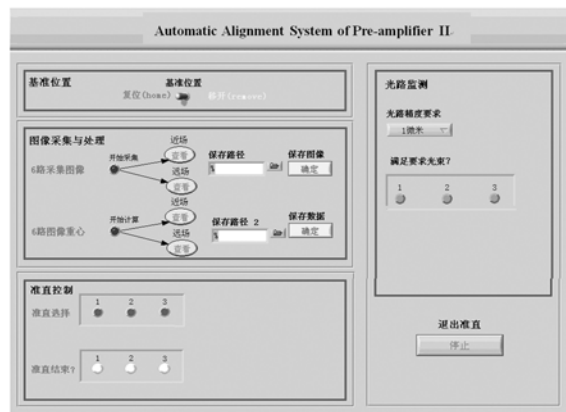


图 2 预放大器 II 自动准直软件界面

Fig. 2 Work interface of automatic alignment software in pre-amplifier II system

叉丝阵列分别成像于近场、远场感光屏, 均采用近场 CCD 进行成像, 软件调用采集到的图像进行图像处理^[16-17]。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区域。在实验中,根据光斑成像位置,基于多光斑最小偏移指标相同的原理,利用 Labview 软件实现了图像区域分割。叉丝阵列图像处理时,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 采集到图像的像素亮度值确定图像边缘,拟合确定十字叉丝轮廓,根据轮廓得到每个叉丝的位置坐标。成像光斑图像处理时,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。这样不论光束具体形状如何,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 范围仍能进行准确调节,从而保证自动准直的调节范围只受限于 CCD 视场。为实现快速准直,实验中使用“一步到位”算法^[15],即根据光路设计参数,假定准直镜调节与近远场 CCD 采集光斑偏移是线性关系,在已知光斑在近远场偏移量的条件下,直接计算出近远场准直镜俯仰与倾斜的调节量。

3.2 阵列光束采集处理实验

高功率准分子激光 MOPA 系统的工作介质为 XeCl 气体,输出 308 nm 波长的激光。为避免斜入射折射光学元件上由激光波长差异导致的色差,光路的准直光源需选用输出波长与 308 nm 主激光相近的器件。本文选择了日本 Kimmon 公司生产的 kk3301R-G 型 He-Cd 激光器,该激光器的输出波长为 325 nm,最大输出功率为 30 mW。实验选择了聚四氟乙烯板、感光屏及紫外荧光板 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 准直激光进行了图像采集及对比。结果表明,聚四氟乙烯板的荧光效果最好,但该荧光发散角较大,到 CCD 接收面的功率最低;紫外荧光板的发散角最小,但紫外荧光板对激光吸收率较大,到 CCD 接收面的功率也较低;感光屏虽然简单,但其 CCD 接收效率最高。通过比较,最终选择感光屏并将它固定到支撑结构上。

移出 $Cross_2$, 移入 $Cross_1$, $Cross_1$ 通过透镜组 L_3 成像到感光屏 FL_1 上, CCD_1 成像系统的采集图像如图 3 所示。移出 $Cross_1$, 移入 $Cross_2$, $Cross_2$ 通过透镜组 L_1 及 L_4 成像到感光屏 FL_2 上, CCD_2 成像系统采集的图像如图 4 所示。从

图 3 及图 4 可以看出,获得了清晰的阵列光束叉丝基准近远场图像,叉丝像辨识度高,便于后期处理,满足阵列光束的准直要求。



图 3 三路准直激光近场成像图

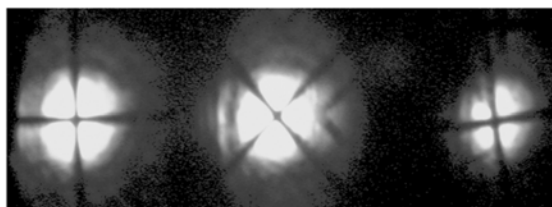
Fig. 3 Near-field image of three beams in automatic alignment system



图 4 三路准直激光远场成像图

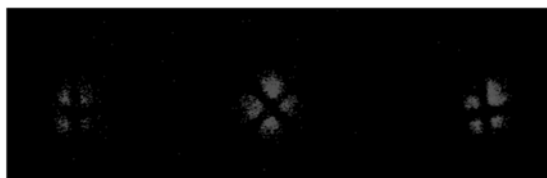
Fig. 4 Far-field image of three beams in automatic alignment system

为便于后续的角多路 MOPA 放大链准直,通过中性衰减片改变准直光源强度,利用上述光路测试了准直取样测量的动态范围。当采用敏通公司生产的普通可见光 CCD 时,动态范围为 40 倍,采集的最强和最弱叉丝图像如图 5(a)和(b)所



(a)最强光强近场成像图

(a)Near-field image with the highest intensity



(b)最弱光强近场成像图

(b)Near-field image with the weakest intensity

图 5 CCD 采集得到的三路准直激光成像图

Fig. 5 Images of three beams in automatic alignment system captured by CCD

示;而采用 Spiricon 公司的 LBA 相机时,动态范围为 300 倍,采集的最强和最弱叉丝图像分别如图 6 和图 7 所示。在高功率准分子激光 MOPA 系统中,需要进行预放大器 II 的 3 路准直及预放大器 III、预放大器 IV 及主放大器 V 的 18 路激光准直。随着光路的增多及光学元件的吸收及反射,每路准直光的强度会逐渐减小,通过计算可知,敏通可见光 CCD 可以满足预放大器 II 及预放大器 III 的光路自动准直;而采用紫外高灵敏

度 CCD 或者 Spiricon 公司的 LBA,则完全能够满足预放大器 IV 和主放大器 V 的 18 路激光准直要求。

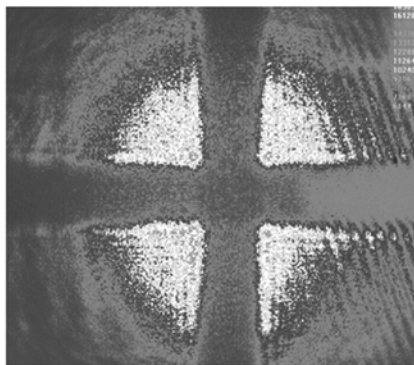


图 6 LBA 上第 3 路激光近场最强像

Fig. 6 Near-field image with the highest intensity of the third beam on LBA

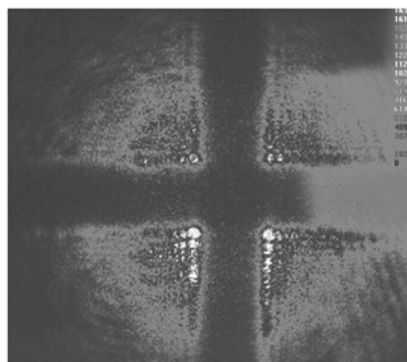


图 7 LBA 上第 3 路激光近场最弱像

Fig. 7 Near-field image with the weakest intensity of the third beam on LBA

3.3 三路双程放大器准直实验

在上述验证基础上,采用叉丝阵列作为准直近远场基准,利用上述荧光成像完成基准的定位与采集。将基准叉丝阵列移出,手动调偏光路,利用控制器、驱动器及相应的闭环反馈控制算法,实现偏差光束的复位,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

序号	叉丝基准坐标		调偏光束坐标		准直后光束与基准差值	
	CCD ₁	CCD ₂	CCD ₁	CCD ₂	CCD ₁	CCD ₂
第一路	(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)
第二路	(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)
第三路	(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,CCD₁ 测量的 3 路光束准直最大偏差发生在 y 方向,差值为 0.94 pixel,CCD₂ 测量的 3 路光束准直最大偏差发生在 x 方向,差值为 0.67 pixel。而在放大器窗口处通过测量准直后光束的偏心率,成像系统的固有误差最大不超过 0.2 mm,即完全吻合理论上准直偏差为光束口径 1.08% 的设计值。当设定准直误差在 1 pixel 之内时,同时调偏 3 路激光后闭环反馈准直的平均时间仅为 40 s,完全满足角多路光束的传输要求。

4 结 论

本文针对高功率准分子激光 MOPA 系统的特点,开展了多路激光准直的图像采集和处理方法研究。结合 MOPA 系统中放大器多程放大的光学设计,建立了基于感光屏和 CCD 的复合成像系统,利用 CCD 同时对感光屏上的多路光束成像,实现了自动准直系统近场、远场的图像采集。

对 MOPA 系统预放大器 II 的 3 路激光自动准直实验结果表明,该方法在精度和时间上均能够满足准分子激光 MOPA 系统多路光束自动准直的

要求。该方法解决了多套 CCD 及支撑结构的空间问题,也大大降低了准直成本,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 D ZH, XU R F, FAN D Y. 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[J]. *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(3)(suppl.): 80-85.
- [4] BOEGE S J, BLISS E S, CHOCOL C J, *et al.*. NIF pointing and centering systems and target using a 351 nm laser source[J]. *SPIE*, 1997, 3047: 248-258.
- [5] 王大辉, 赵学庆, 张永生, 等. 电子束泵浦准分子激光放大器的双程光路自动准直[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1434-1439.
- WANG D H, ZHAO X Q, ZHANG Y SH, *et al.*. Automatic alignment of double paths in electron pumped excimer laser amplifier[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1434-1439. (in Chinese)
- [6] CHANG CH W, SU D CH. Collimation method that uses spiral gratings and Talbot interferometry[J]. *Opt. Lett.*, 1991, 16(22): 1783-1784.
- [7] 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.
- LIU D ZH, XU R F, FAN D Y. Evolution of beam automatic alignment system in laser-fusion facility[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, 41(2): 1-5. (in Chinese)
- [8] 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.
- GAO Y Q, ZHU B Q, LIU D ZH, *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)
- [9] 孟贤男, 曾理江. 用大像元 CMOS 线阵光电探测器和插值法测量激光光斑中心位置[J]. *中国激光*, 2002, 29(1): 69-72.
- MENG X N, ZENG L J. Measuring the laser beam position by using a CMOS photodiode array and interpolation method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(1): 69-72. (in Chinese)
- [10] 田振华, 胡永生, 秦莉, 等. 高功率垂直腔面发射激光器的光束准直特性[J]. *发光学报*, 2011, 32(9): 939-943.
- TIAN ZH H, HU Y SH, QIN L, *et al.*. Collimation of high power vertical cavity surface emitting laser[J]. *Chin. J Lumn.*, 2011, 32(9): 939-943. (in Chinese)
- [11] 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.
- PAN G F, ZHANG J X, CHEN J. Common path auto-alignment system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(10): 1500-1502. (in Chinese)
- [12] 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.
- LIU D ZH, ZHU J Q, XU R F, *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)
- [13] ZHENG D F, WANG X ZH, TANG F. An improved method of angle measurement with a position sensitive detector[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, 5(7): 403-406.
- [14] 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.
- HE W, XU Q H, XU R F, *et al.*. Image transfer based automatic laser alignment technique for laser-fusion facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(9): 1279-1283. (in Chinese)
- [15] 尉鹏飞, 刘军, 李晓芳, 等. 激光光束实时监测与

- 自动准直系统设计[J]. *光学学报*, 2008, 28(8): 1590-1595.
- WEI P F, LIU J, LI X F, *et al.*. Design of laser beam real-time monitoring and adaptive collimation system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(8): 1590-1595. (in Chinese)
- [16] 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.
- LÜ F N, LIU D ZH, XU R F, *et al.*. Performance of image processing in beams automatic alignment system [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(3): 335-337. (in Chinese)
- [17] 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.
- KONG B, WANG ZH, TAN Y SH. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(3): 275-279. (in Chinese)

作者简介:



王大辉(1986—),男,河南商丘人,助理研究员,2007年于清华大学获得学士学位,2010年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光技术应用及等离子体物理等方面的研究。E-mail: wangdahui@nint.ac.cn



钱航(1981—),男,新疆乌鲁木齐人,工程师,2003年于解放军信息工程大学获得学士学位,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

(版权所有 未经许可 不得转载)