

文章编号 1004-924X(2012)07-1434-06

电子束泵浦准分子激光放大器的 双程光路自动准直

王大辉*, 赵学庆, 张永生, 孙昱薇, 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:提出了一种电子束泵浦准分子激光放大器的双程光路准直方法,以保证光束在放大器中按照预定方向传输,并使多路光束稳定精确地照射靶面。首先,鉴于准分子放大器中无天然准直基准提出了利用双叉丝像传递光路进行准直的方法,即把输入光束叉丝基准作为“近场点”,把输出光束叉丝基准作为“远场点”,并设计了放大器准直光路,编写了相应的软件。然后,在现有实验室条件下开展了电子束泵浦准分子激光放大器双程光路的自动准直实验。最后,分析了影响该方法的相关因素及准直精度。实验及分析表明,设计的准直系统在较短时间内实现了预定传输光路的自动准直,系统自身精度为 $0.63\ \mu\text{rad}$,光束最大复位误差为 $13.75\ \mu\text{m}$,满足了电子束泵浦准分子激光放大器双程光路自动准直的要求。

关键词:激光技术;自动准直;电子束泵浦;准分子激光;激光放大器;叉丝

中图分类号:TN248.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122007.1434

Automatic alignment of double paths in electron pumped excimer laser amplifier

WANG Da-hui*, ZHAO Xue-qing, ZHANG Yong-sheng, SUN Yu-wei, ZHAO Jun

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

* Corresponding author, E-mail: chsslw@163.com

Abstract: A kind of beam automatic alignment method used for double path amplification in an electron pumped excimer laser system was presented to ensure the beams from the amplifiers to transfer in a designed direction and irradiate on a target stably and accurately. As excimer laser amplifiers had no natural alignment references, an image-relaying structure with two cross-hairs was proposed, in which the cross-hair on the input beam was regarded as the near-field reference while the cross-hair of output beam was regarded as the far-field reference. Then, an alignment beam path was designed and the software was compiled. Furthermore, the automatic alignment experiment of double paths in electron pumped excimer laser amplifier was performed and the correlative influence factors and the alignment precision were analysed. Experimental results indicate that the automatic alignment system can achieve the beam transmission given in short time, the accuracy of alignment system is $0.63\ \mu\text{rad}$ and the beam maximum restoration error is $13.75\ \mu\text{m}$. Obtained results satisfy the demand of beam alignment.

收稿日期:2012-01-16;修订日期:2012-03-05.

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目(No. SKLLIM1106)

Key words: laser technology; automatic alignment; electron pumping; excimer laser; laser amplifier; cross-hair

1 引言

大型高功率激光核聚变装置是规模最大的一类激光系统,其中包含大量的激光器件、光学元件和组件。电子束泵浦放大器是高功率准分子激光系统的重要组成部分,通常采用双程放大形式,输入输出耦合阵列距离后腔镜达十几米或更长,必须保证各路光束按预定路径通过放大器,一方面因为光束传输方向决定了几何填充和能量提取水平;另一方面可避免各路光束相互之间发生串扰,产生靶前预脉冲。为了能够在系统运行时将从振荡器发出的光束稳定精确地照射到靶面上,需要配置光路自动准直系统^[1-3],以纠正由于温度变化、地基及支撑架的微振动、反射镜机械结构蠕变、气流和其它随机因素造成的光束偏离。

目前,已经研究和发展起来的光路自动准直方法是基于高功率固体激光装置,选用光路上某个光学元件的几何中心作为近场基准点,光路上空间滤波器的滤波小孔几何中心作为远场基准点,以此近、远场基准点来复原光路^[4-8]。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,为发挥器件均匀性好的优势,电子束泵浦准分子激光器采用了无阶梯诱导空间非相干(Echelon Free Induced Space Incoherence, EFISI)技术,基于主振荡功率放大(MOPA)技术的放大链为部分相干光的像传递光路,它不进行空间滤波,光路中不设类似固体激光装置中的滤波针孔,因此需另外引入光路准直的基准,如选择插入式十字叉丝作为基准来满足要求。何为、陈庆浩等提出了一种基于十字叉丝的自动准直装置^[8],以单叉丝为初始物,叉丝通过空间滤波器成像作为近场,空间滤波器的小孔面成像作为远场,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成像作为远场基准,而电子束泵浦准分子激光器的双程放大光路没有空间滤波器这一基准,也不能进行光路远场的准直。

本文提出了一种采用双叉丝基准的准直方法,较好地解决了电子束泵浦准分子激光装置无

空间滤波器等天然基准及存在激光双程放大情况等问题,可用于电子束泵浦准分子激光双程放大的光路准直。

2 准直方案

在大型激光装置中,空间域的光束平滑通常采用高保真的像传递来实现,通过像传递结构将振荡器输出的均匀强度分布在光路中逐级传递,重新成像在放大器或者频率转换装置的附近,从而使强度噪声的增长在原始输入分布的像面上复位为零,达到了改善光束质量的目的。通过合理设计成像光路实现基准像的采集与处理,把输入光束叉丝基准作为“近场点”,把输出光束叉丝基准作为“远场点”,既解决了电子束泵浦准分子激光器无确定基准的问题,也实现了激光器双程放大光路的准直。

2.1 光学系统的结构设计

设计的准直光路如图1所示, $M_0 \sim M_4$ 为反射镜,BS为分束片, $L_1 \sim L_4$ 为透镜,Cross1、Cross2为十字叉丝,其中 M_0 、 L_4 、Cross1和Cross2为电控插入式光学元件, M_1 和 M_2 为伺服反射镜。对于主激光光路,前一级放大器FO-TOH3输出光束经正透镜 L_1 和负透镜 L_2 成像扩束,由 M_1 、 M_2 将光束引导到此级放大器,依靠凹面反射镜实现双程放大和光束缩束,由 M_3 送

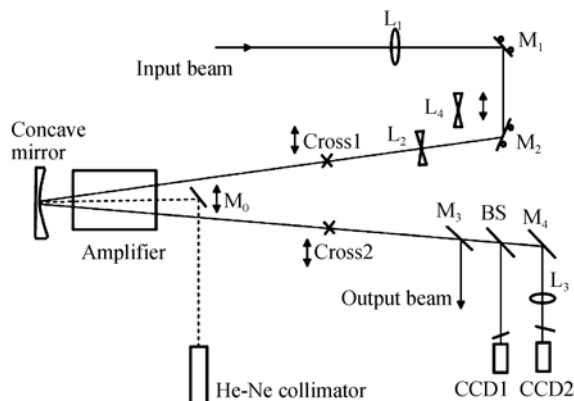


图1 电子束泵浦准分子激光器双程放大准直光路布局

Fig.1 Automatic alignment system of electron pumped excimer laser double path amplifier

入电子束泵浦主放大,凹面反射镜口径为 $\Phi 300$ mm,曲率半径为 10 m;该放大器的准直光路由准直光源、插入式基准、反射镜、透镜和利用反射镜 M_3 的漏光搭建的准直测量环节组成。准直环节中,十字叉丝 Cross1 通过凹面反射镜成像在 CCD1 处,十字叉丝 Cross2 通过透镜 L_3 成像在 CCD2 处;插入式元件 L_4 为扩束透镜,用于不单独引入其它照明光源的情况下实现了对十字叉丝清晰照明;伺服反射镜 M_1, M_2 通过电机的调节用于光路的误差闭环反馈控制。后腔镜的准直只是腔镜与放大器同轴的准直,不需要对主光路的准直,准直光源选用氦氖激光经纬仪;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 nm 主激光相近的氦镉激光器,其输出激光波长为 325 nm。

2.2 光路准直原理

光路自动准直系统根据两点一线的原理来实现,通常按照像传递系统建立近场和远场探测系统。用基准叉丝 Cross1 和 Cross2 来取代近场点和远场点,但需要确认该方法的可行性。

基准叉丝 Cross1 通过腔镜成像于 CCD1 处,假定叉丝 Cross1 距离腔镜为 d_1 ,腔镜距离 CCD1 为 d_2 ,腔镜曲率半径为 R ,则有 $\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{2}{R}$,成像横向放大率 $\beta_1 = \frac{d_2}{d_1}$;基准叉丝 Cross2 通过透镜 L_3 成像于 CCD2 处,假定叉丝 Cross2 距离透镜 L_3 为 D_1 ,透镜 L_3 距离 CCD2 为 D_2 ,透镜 L_3 焦距为 f ,则有 $\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} = \frac{1}{f}$,成像横向放大率 $\beta_2 = \frac{D_2}{D_1}$ 。

假定 α 表示反射镜 M_1 或者 M_2 的角度调整量,在小角度范围内,有 $\Delta_{\text{cross11}} \approx l_{11} \times 2\alpha, \Delta_{\text{cross12}} \approx l_{12} \times 2\alpha$,其中 Δ_{cross11} 表示调整反射镜 M_1 造成叉丝 Cross1 位置处的光束移动量, Δ_{cross12} 表示调整反射镜 M_2 造成叉丝 Cross1 位置处的光束移动量, l_{11} 表示反射镜 M_1 与叉丝 Cross1 的距离, l_{12} 表示反射镜 M_2 与叉丝 Cross1 的距离;同理可以得到 $\Delta_{\text{cross21}} \approx l_{21} \times 2\alpha, \Delta_{\text{cross22}} \approx l_{22} \times 2\alpha$,其中 Δ_{cross21} 表示调整反射镜 M_1 造成叉丝 Cross2 位置处的光束移动量, Δ_{cross22} 表示调整反射镜 M_2 造成叉丝 Cross2 位置处的光束移动量, l_{21} 表示反射镜 M_1 与叉丝 Cross2 的距离, l_{22} 表示反射镜 M_2 与叉丝

Cross2 的距离。

所以,在反射镜 M_1 或者 M_2 的角度调整为 α 时,CCD1 处光束偏移量为: $\Delta_{\text{ccd1}} \approx l_{11} \times 2\alpha \times 2\beta_1$, $\Delta_{\text{ccd1}} \approx l_{12} \times 2\alpha \times 2\beta_1$; CCD2 处光束偏移量为: $\Delta_{\text{ccd2}} \approx l_{21} \times 2\alpha \times 2\beta_2, \Delta_{\text{ccd2}} \approx l_{22} \times 2\alpha \times 2\beta_2$ 。由此可知,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 方向的线性移动,这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。

2.3 采集控制程序的设计

光路自动准直软件由 Visual C++ 程序编写,具有光束采集、计算和反馈控制的功能,人机对话界面如图 2 所示。界面的 CH1 和 CH2 对应着 CCD1 和 CCD2 两个成像通道;在图像采集的子菜单中,可以利用测量光束定义基准位置,该位置坐标值显示在界面右下方,便于观察。在手动调整状态,基准位置显示为绿色原点;在自动准直状态,基准坐标以绿色十字线标出,而光束的实时重心位置以红色十字线表示,调节过程中可以看到红色十字线向绿色十字线的动态逼近过程,直至达到预设的误差范围。

图像重心计算对采集到的图片进行处理^[9-11],包括图像的阈值化处理去除噪声、中值滤波去除孤立点及重心计算等处理,从而得到光束的重心数据。为实现自动准直的收敛,反馈控制算法采用水平和垂直方向的均衡调节法,以单位步长依次驱动调节架上两个步进电机,避免因非对称偏移而导致调节过程中光束超出 CCD 视场并使循环过程突然中断的现象发生。根据具体光路和准直精度要求,设定准直误差限。

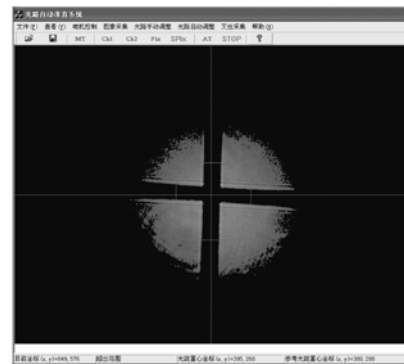


图 2 自动准直软件界面

Fig. 2 Work interface of automatic alignment software

3 实验结果

3.1 准直实验

实验主要包括后腔镜准直、叉丝基准定位与采集、偏差光路光束测量及计算机反馈控制4个步骤。

首先,采用 He-Ne 激光经纬仪进行后腔镜的准直,插入腔镜准直反射镜使经纬仪出射激光通过放大器前后窗口中心,调节腔镜使反射光与出射光在经纬仪激光出射处严格同心,完成腔镜的准直;其次,通过带光栅尺的步进电移台带动叉丝实现插入退出,在输入和输出光路插入 Cross1、Cross2 和

准直激光扩束透镜 L_4 ,并使之与准直激光中心重合,计算叉丝中心作为准直基准,完成叉丝基准的定位与采集;再次,移出两个叉丝,调偏光路或者在光学元件长时间偏移造成光路偏转情况下,采集测量准直激光光斑图像,计算光斑图像的重心坐标,完成偏差光路的光束测量;最后,依据光束重心坐标与基准坐标误差信号,通过计算机反馈闭环控制伺服反射镜 M_1, M_2 ,实现上述两坐标的重合。

3.2 准直结果

3.2.1 基准复位稳定性结果

十字叉丝的移入与移出由带光栅尺的步进电移台控制,为验证两个十字叉丝基准的复位精度,对叉丝成像坐标进行了测量,结果如表1所示。

表1 叉丝基准坐标测量结果

Tab.1 Test results of cross-hair coordinate

No.	1	2	3	4	5	Average
Cross1	(386,288)	(385,289)	(385,289)	(386,288)	(385,288)	(385,289)
Cross2	(383,303)	(383,303)	(383,303)	(383,303)	(383,303)	(383,303)

由表1可以看出,Cross15次对中心的测量具有较大偏差,CCD1上光斑偏差 <2 个像素,而Cross2成像在CCD2上光斑偏差 <1 个像素。主要原因有:(1)叉丝Cross1通过腔镜在CCD1上成放大的像,而叉丝Cross2通过透镜 L_3 等比成像在CCD2;(2)叉丝Cross1通过腔镜成像,腔镜本身稳定性不好,而且其面形质量的好坏会造成一定的像差,而叉丝Cross2成像光路中使用的是稳定性较好的小口径光学镜架,对光束成像影响较小。

3.2.2 准直实验结果

首先进行后腔镜准直和叉丝与氦镉激光源定位,之后进行调偏光路准直测量,任意调偏光路,反复进行了5次准直实验,调偏光路及准直后光束重心坐标的测量结果如表2所示。

由表2可以看出,准直前光束近远场均偏离了叉丝基准坐标几个像素,在准直后光束重心坐标与叉丝基准坐标误差均在1个像素之内,实现了电子束泵浦双程准分子激光放大器双程光路的自动准直,满足了光路自动准直的预定精度要求。

3.3 准直精确度分析

为了满足光路中电子束泵浦放大器准分子激光放大器双程放大光路的自动准直,必须确保准直自身的精度满足其指标要求。

表2 调偏光路准直前后的光束测量

Tab.2 Beam measurements before and after automatic alignment

No	Before alignment		After alignment	
	CCD1	CCD2	CCD1	CCD2
1	(391,288)	(384,296)	(385,288)	(383,304)
2	(388,288)	(385,305)	(387,288)	(383,303)
3	(387,287)	(383,301)	(387,288)	(382,302)
4	(390,286)	(382,304)	(386,287)	(383,302)
5	(387,288)	(379,302)	(387,288)	(384,303)
Average	(389,287)	(383,302)	(386,288)	(382,302)

3.3.1 光路布局精度

利用两个叉丝作为定位基准进行自动准直,用 r 表示基准处光束半径, n 为CCD相机采样光斑在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, L 为两个准直参考面的距离。可以得到 $d = \frac{2r}{n} = 2r / \left[\frac{S}{A_{\text{pixel}}} \right] = \frac{A_{\text{pixel}}}{\gamma}$, $\theta \approx \frac{d}{L} = \frac{A_{\text{pixel}}}{\gamma L}$,其中 S 为CCD相机采样光斑水平或者竖直方向上大小, A_{pixel} 为CCD单个像素的大小($6.25 \mu\text{m}$), γ 为CCD近远场成像系统的放大率, θ 为光路布局角度误差。由于 A_{pixel} 为固定值, γ 根据成像系统设计而定,所以两个叉丝之间的间距影响了

准直的稳定精度。叉丝之间间距越长,精度越高。

现有的准直光路布局中,叉丝 Cross1 通过腔镜成像在 CCD1 上,叉丝 Cross1 距腔镜 $x=8$ m,腔镜曲率半径 $R=2f=10$ m,所以根据单透镜成像公式可以得到 CCD1 距离腔镜 $40/3$ m;叉丝 Cross2 通过成像透镜等比成像在 CCD2 上。CCD 本身的测量精度为 Cross1 个像素,所以根据成像关系可知,叉丝 Cross1 物方分辨率为 0.6 像素,叉丝 Cross2 物方分辨率为 1 个像素。

由上述分析得到,两个叉丝的总精度为 1.6 个像素。采用敏通公司的 CCD 进行光束采集,像面尺寸为 $4.8\text{ mm}\times 3.6\text{ mm}$,像素总数为 $768(\text{H})\times 576(\text{V})$,像素尺寸为 $6.25\text{ }\mu\text{m}$ 。由于两叉丝实际相距 16 m,所以双叉丝基准自身准直精度为 $1.6\times 6.25/16\approx 0.63(\mu\text{rad})$ 。

3.3.2 光束复位精度

通过对叉丝基准复位稳定性测量结果可知,叉丝 Cross1 成像在 CCD1 上偏差小于 2 个像素,而叉丝 Cross2 成像在 CCD2 上偏差小于 1 个像素。根据成像关系,可以得到叉丝 Cross1 复位误

差最大为 1.2 个像素,Cross1 复位误差最大为 1 个像素,所以光束复位精度取最大值为 2.2 个像素,即 $2.2\times 6.25=13.75(\mu\text{m})$ 。

对于角多路在放大器中按预定路径传输而言,这个误差是可以接受的,即满足放大器光路准直的要求。但不能由此断定该误差满足系统要求,作为角多路 MOPA 系统,靶面光束定位误差对放大器提出相应的准直精度要求,因此需要结合系统要求进行更为深入的分析研究。

4 结 论

针对电子束泵浦准分子激光放大器双程放大光路,设计了一套新的光路自动准直装置。利用双十字叉丝作为基准,完成了自设基准向近远场设计思路的转换。通过实验和精度分析得到,准直系统自身精度为 $0.63\text{ }\mu\text{rad}$,光束最大复位误差为 $13.75\text{ }\mu\text{m}$,能够满足放大器自动准直的要求。该自动准直方案结构紧凑,针对性强,已经成功应用于角多路高功率准分子打靶试验平台光路的自动准直中。

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): 80-85.
- [4] 史亚莉,高云国,张磊,等. 提高 CCD 激光自准直测角精度的硬件方法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(4): 726-732.
SHI Y L, GAO Y G, ZHANG L, *et al.*. Improvement of measuring accuracy of CCD laser autocollimator by changing hardware parameters[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 726-732. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] 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): 41-46.
GAO Y Q, ZHU B Q, LIU D ZH, *et al.*. Far field auto-alignment system used in SG-II-UP system[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2011, 60(6): 41-46. (in Chinese)
- [7] 赵会富,刘华,孙强,等. 基于折射/全反射/反射/折射结构的 LED 准直系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7): 1472-1478.
ZHAO H F, LIU H, SUN Q, *et al.*. Design of RIXR LED collimation system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1472-1478. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 刘炳国,宫娜,刘国栋,等. ICF 靶场坐标系的建立及其监测方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7): 1070-1075.

- LIU B G, GONG N, LIU G D, *et al.*. Building method of ICF chamber center reference system and its monitoring[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1070-1075. (in Chinese)
- [10] 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(增): 167-171.
- HUA H Q, ZHAO X Q, XUE Q X, *et al.*. Optical automatic alignment on amplification experiment of double ultraviolet laser pulse[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(Suppl.): 167-171. (in Chinese)
- [11] 柏占伟, 谢志江, 袁晓东. 阵列 4×1 准直光源关键技术研究[J]. *现代科学仪器*, 2010, 5: 10-14.
- BO ZH W, XIE ZH J, YUAN X D. Research on critical technology of 4×1 collimated light arrays [J]. *Modern Scientific Instruments*, 2010, 5: 10-14. (in Chinese)
- [12] 郭林辉, 高松信, 武德勇, 等. 二极管激光器垂直阵列光束精密准直[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(3): 577-580.
- GUO L H, GAO S X, WU D Y, *et al.*. Beam collimation of diode laser vertical stack[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(3): 577-580. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 史磊, 金光, 田海英, 等. 航空相机的自准直自动检测方法研究[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(12): 2460-2464.
- SHI L, JIN G, TIAN H Y, *et al.*. Autofocusing method with automatic calibration for aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2460-2464. (in Chinese)
- [15] 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.
- YANG ZH, LI G Y, HE L. Measurement methods and precision analysis of optical collimation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 282-286. (in Chinese)

作者简介:



王大辉(1986—),男,河南商丘人,助理研究员,2007年于清华大学精密仪器机械学系获学士学位,2010年于西北核技术研究所获硕士学位,主要从事激光测量及控制等方面的研究。E-mail: chsslw@163.com



孙昱薇(1985—),女,陕西富平人,助理研究员,2011年于西北大学获硕士学位,主要从事信号与信息处理与数据库挖掘等方面的研究。E-mail: yszx07@163.com



赵学庆(1966—),男,河北阜城人,研究员级高级工程师,1989年于哈尔滨工业大学获学士学位,2005年于国防科技大学获硕士学位,主要从事高功率激光及其应用方面的研究。E-mail: zqx.hb@163.com



易爱平(1969—),男,江西东乡人,副研究员,1991年于厦门大学获学士学位,2002年于国防科技大学获硕士学位,主要从事激光技术及应用、脉冲功率技术等方面的研究。E-mail: aiping0707007@hotmail.com



张永生(1973—),男,辽宁朝阳人,副研究员,1995年、1998年于长春光学精密机械学院(现长春理工大学)分别获学士、硕士学位,主要从事高功率准分子激光技术及其应用方面的研究。E-mail: zhangyssh_2006@yahoo.com.cn



赵 军(1955—),男,山东济南人,研究员,2005年于国防科技大学获博士学位,主要从事等离子体物理、信号信息处理及航空航天测控技术方面的研究。E-mail: zhaojun@163.com