

# 神光 II 升级装置远场准直系统研究\*

高妍琦 朱宝强<sup>†</sup> 刘代中 彭增云 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

(2010年6月30日收到; 2010年8月9日收到修改稿)

用于实现光束调整的自动准直系统不仅是保证高功率激光装置高效、安全、可靠运行的关键子系统, 同时也是保证光束近场和远场质量的关键要素之一. 通过巧妙的光栅制作和照明成像系统设计, 实现了高精度、模块化的远场准直系统. 其特点在于利用光栅的衍射特性, 实现了远场焦斑和基准的同时离轴取样. 此系统在神光 II 升级装置预放系统的实验结果表明, 其光栅基准的复位精度优于  $8\ \mu\text{m}$ , 准直过程中基准的抖动低于  $0.59\ \mu\text{m}$ ; 准直完成后, 焦斑中心和基准中心的最大偏差优于  $10\ \mu\text{m}$ . 此系统在实现了高精度取样、准直的前提下, 不仅降低了对成像系统稳定性的要求, 同时节省了巨大空间, 为保证神光 II 升级装置的顺利研制, 以及实现整个系统的集成化、模块化提供了有力支撑.

**关键词:** 激光技术, 激光光学系统, 空间滤波器

**PACS:** 52.57. - z, 42.60. - v, 42.79. Ci

## 1. 引言

激光聚变研究的不断深入对高功率固体激光驱动器提出了越来越高的要求. 同时, 由于高功率固体激光器的功率不断提高, 系统结构更加复杂, 人们对其可靠性以及可操作和易维护上也提出了越来越高的要求. 新一代激光驱动器, 如美国的 OMEGA-EP<sup>[1,2]</sup> 和国家点火装置 NIF<sup>[3-6]</sup>、法国的兆焦耳级激光装置 LMJ<sup>[7]</sup>、我国的神光 II 升级装置<sup>[8,9]</sup> 以及神光 III 装置<sup>[10,11]</sup>, 正在向模块化、智能化的方向发展. 自动准直系统, 尤其是远场自动准直系统, 是保证该类型驱动器正常运行的关键子系统. 远场准直系统的精度和可靠性不仅是保证打靶精度的关键所在<sup>[12]</sup>, 同时也是防止激光堵孔<sup>[13,14]</sup>、提高近场和远场光束质量<sup>[15-17]</sup>、保证系统安全的重要因素.

为了满足神光 II 升级装置的设计要求, 我们摒弃了神光 II 原有的“以动制动”的准直方式, 利用光栅的衍射特性, 设计并实现了基于光栅取样的全新的、模块化的远场准直系统. 本文首先介绍了此系

统的系统结构, 其中包括准直系统设计和远场取样系统; 随后给出了其在神光 II 升级装置预放系统的实际应用结果.

## 2. 远场准直系统

在高功率激光系统中, 光束远场通常指的是光束经过透镜会聚之后的焦斑. 远场的横向位置信息对应于光束的指向信息. 远场的控制精度和稳定性直接决定光束到达靶室中靶球处的打靶精度. 同时, 空间滤波器中的远场控制精度与光束近场和远场质量有着密切的关系. 空间滤波器在现代高功率固体激光系统中发挥着极其重要的作用: 抑制小尺度自聚焦、实现像传递、抑制寄生振荡等<sup>[16,18]</sup>. 高精度的远场准直控制是实现空间滤波器功能的必要条件. 下面将详细描述基于光栅取样的模块化的远场准直控制方式.

### 2.1. 准直系统设计

神光 II 升级装置预放系统采用分级放大的 MOPA 型结构, 共分为 4 级放大. 以第一级空间滤波器准直系统为例, 说明新型远场准直系统的准直原理及实施

\* 国家高技术研究发展计划(批准号:2007SQ804)、中日韩激光聚变高能量密度物理合作研究、中国科学院大科学装置配套改造项目资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: baoqzhu@siom.ac.cn

步骤,其余3级均与此类似. 图1给出了神光II升级装置预放系统第一级空间滤波器的准直示意图. 由再生放大器输出的光束经反射镜  $M_1$ ,  $M_2$  反射后,经过近场基准、取样板,进入空间滤波器. 空间滤波器的共焦面上放置滤波小孔,用于滤除光束近场的高频成分,改善近场质量,从而抑制小尺度自聚焦,同时隔离杂散光和背向反射光. 在小孔板前方放置经过特

殊设计的光栅,利用光栅的衍射特性,实现对远场的在线取样;同时,光栅刻有定位基准,可以在光致二极管(LED)照明系统和成像系统的帮助下给出系统的远场绝对基准. 通过反馈控制系统调整远场控制反射镜  $M_2$ ,使焦斑的中心和光栅的基准中心重合,即完成远场准直. 以上过程均基于同一个前提:光栅基准中心和滤波小孔中心完全重合.

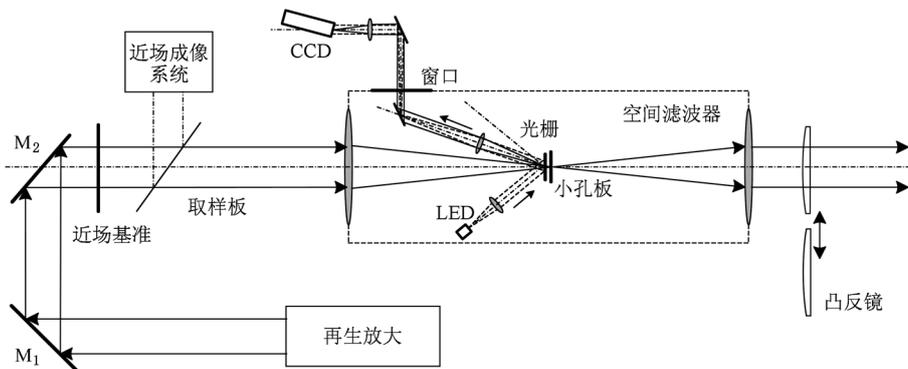


图1 准直系统

系统准直可以分为5个步骤进行.

1) 确定光栅基准位置,作为系统远场绝对基准. 利用LED照明和远场成像系统取样,通过调节光栅基准位置使光栅基准和系统光轴重合.

2) 调整小孔中心和光栅基准重合. 小孔板安装于微米级二维移动平台上,调节小孔板位置使主激光焦点通过滤波小孔,插入凸反镜,利用其反射光背向照明小孔,小孔投影通过取样光栅衍射并进入成像系统,此时再次调节移动平台使小孔中心和光栅基准精确重合.

以上两步只在系统初始安装时进行,系统正常运行时不需再作调整.

3) 调整  $M_1$ ,使光束中心和近场基准重合.

4) 调整  $M_2$ ,使光束焦斑中心和远场基准重合. 正常运行时,调整  $M_2$  之前需先移入光栅,使光栅精确复位.

5) 移出取样光栅,准直完成.

从以上描述可以看出,该系统中的关键技术包括刻有基准的取样光栅、离轴照明成像系统和光栅的高精度重复定位.

## 2.2. 远场取样系统

远场取样系统是上述系统的核心所在,其功能主要包括提供系统的远场绝对基准、实现远场焦斑

位置和基准的高精度离轴取样.

为了实现用光栅提供系统绝对基准的功能,在光栅的制作过程中,我们采用选择性的刻蚀与不刻蚀一定区域,制作出如图2(a)所示的光栅,图中4个小圆点为非刻蚀区,其他为刻蚀区. 利用其1级衍射光进行成像后,会得到如图2(b)所示的效果. 刻蚀区有衍射能量进入成像系统,其像面表现为亮区,非刻蚀区因不产生衍射,其像面表现为暗区. 我们把处于对角线位置的两组小圆圆心构成的直线交点作为远场的绝对基准点.

图3给出了远场取样系统的设计原理图,实线表示主激光及其衍射光,虚线表示LED照明光及其衍射光. 为了实现主激光焦斑和绝对基准的同时成像,必须使主激光1级衍射光和照明光1级衍射光方向完全重合,同时必须满足成像质量的要求. 这就要求选取合适的照明光源和光栅参数. 考虑到系统对成像质量和光束方向性的要求,我们选用中心波长为940 nm,功率为1 W的LED作为光栅基准的照明光源. LED光源具有窄带、非相干性的特点,能很好满足系统的要求. 光栅选用322刻线,即栅距为  $3.1 \mu\text{m}$  的透射式衍射光栅. 光栅的衍射公式为

$$d(\sin\theta_o \pm \sin\theta_i) = k\lambda, \quad (1)$$

其中  $\theta_i$  为入射角,  $\theta_o$  为衍射角,  $d$  为栅距. 对于主激光,其入射角  $\theta_{im} = 0$ ,对应的衍射角  $\theta_{om} = \arcsin \frac{\lambda_m}{d}$

$= \arcsin \frac{1.053}{3.1} = 19.86^\circ$ . 照明光选用 -1 级与主激光耦合, 即其 -1 级衍射角  $\theta_{oz}$  必须等于  $19.86^\circ$ , 可

求得 LED 照明光入射角  $\theta_{iz} = \arcsin(-\frac{\lambda_{LED}}{d} - \sin\theta_{oz}) = -40.01^\circ$ . 光栅刻蚀深度选为 150 nm.

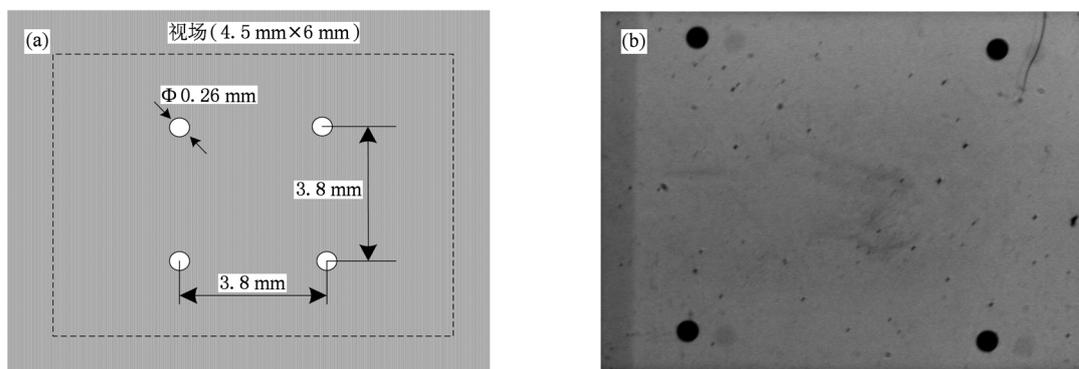


图 2 远场取样光栅 (a) 设计图, (b) 实验所得结果

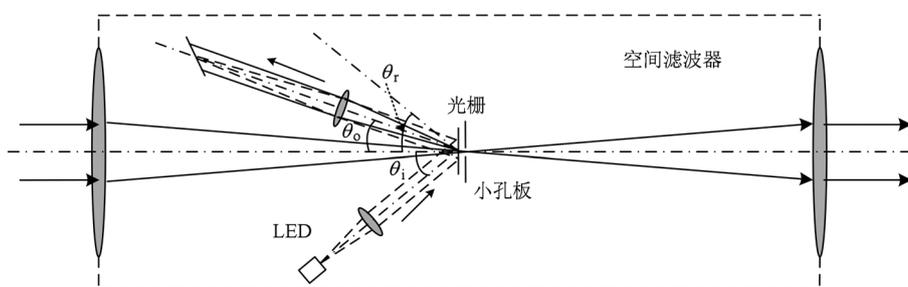


图 3 远场取样系统原理示意图

图 4 给出了远场成像系统的设计原理图. 本系统采用双远心光路, 分为前组和后组. 前组由成像物镜组、远心光阑和导光反射镜组成, 位于空间滤波器真空室内; 后组由导光反射镜、目镜组和电荷耦合器件 (CCD) 构成, 位于空间滤波器外部. 由于该系统为斜成像系统, 物面不垂直于成像系统光轴, 为了使像面上每点都满足成像关系, CCD 靶面必须与成像系统光轴倾斜放置以满足斜成像条件.

该系统放大倍率为 1, 由斜成像条件可计算出其倾斜角  $\beta = \theta_0 = 19.86^\circ$ . 图 5 所示为远场取样系统中空间滤波器内部的实物照片.

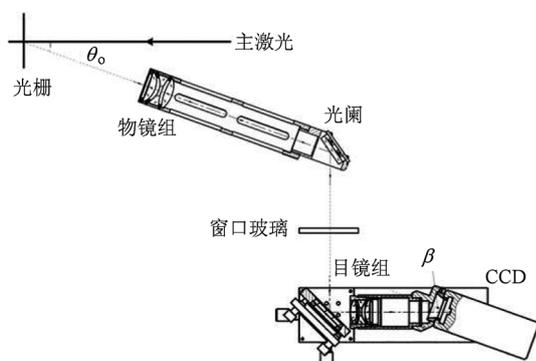


图 4 远场成像系统原理示意图

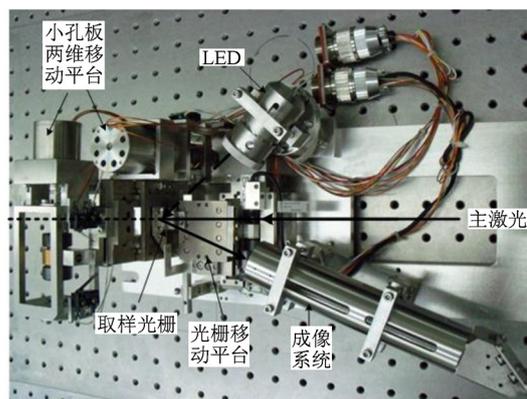


图 5 远场取样系统实物照片

### 3. 实验结果

利用上述系统, 我们实现了神光 II 升级装置预

放系统的远场准直. 下面将就远场准直系统的关键参数进行实验研究, 主要包括远场光栅复位精度和焦斑定位精度.

### 3.1. 光栅重复定位精度

如上所述, 在系统初次安装完成之后, 空间滤波器的小孔位置不再改变. 系统在每次打靶之前必须进行准直, 此时就要移入取样光栅, 使焦斑中心位置与小孔中心重合. 之后移出光栅, 准直完成. 以上步骤的前提就是光栅必须能够高精度重复定位. 在完成该系统的设计加工之后, 我们对其重复定位精度进行了测量. 测试光路图类似于图 1 (此测试光路中不含主激光). 测试方法是每隔 10 min 光栅平台往复一次, 测量其在限位处的光栅基准中心. 测试所用 CCD 像元尺寸为  $8 \mu\text{m}$ , 成像系统放大率为 1. 图 6 给出了典型的测试图样和实验结果. 光栅基准坐标的获取方法如下: 首先把图 6 (a) 中的黑色小圆从左上角开始

按照顺时针的顺序依次编序, 其坐标分别为  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ ; 光栅基准的位置为第 1 个小圆与第 3 个小圆中心连线和第 2 个小圆与第 4 小圆中心连线的交点, 其坐标  $(x^s, y^s)$  由下列直线方程组给出:

$$\begin{aligned} y^s &= \frac{y_3 - y_1}{x_3 - x_1}(x^s - x_1) + y_1, \\ y^s &= \frac{y_4 - y_2}{x_4 - x_2}(x^s - x_2) + y_2. \end{aligned} \quad (2)$$

图 6 (b) 给出了神光 II 升级装置预放系统 4 级空间滤波器远场取样系统的重复定位精度测试结果, 横坐标表示第  $n$  次重复测量, 纵坐标表示对应次测量的光栅基准坐标.  $(x_j^s, y_j^s)$ ,  $j = 1, 2, 3, 4$ , 分别表示预放系统四级空间滤波器 SF1, SF2, SF3 以及 SF4-34 套远场取样系统的光栅基准坐标. 图 6 (b) 中每条线的抖动即反映了其重复定位的精度. 由结果可以看出, 这 4 套远场取样系统的最大定位偏差为 1 个像素, 对应于  $8 \mu\text{m}$ .

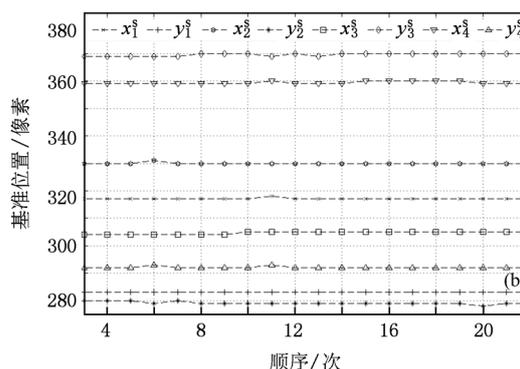
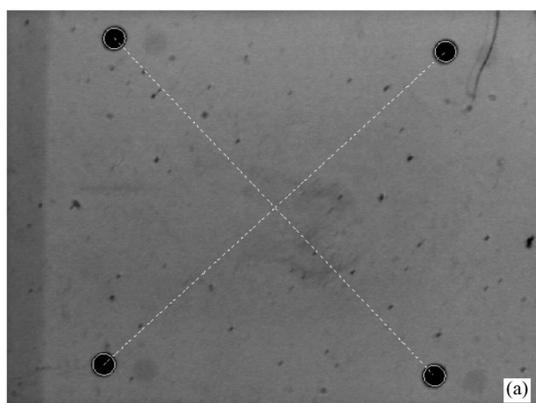


图 6 光栅重复定位 (a) 典型的基准图, (b) 预放系统 4 级取样光栅重复定位实验结果

### 3.2. 准直结果

图 7 给出了在图 1 所示的预放系统第 1 级空间滤波器的远场准直图. 图 7 (a) 为焦斑存在偏差时的取样图, 图 7 (b) 为准直完成之后的远场取样图. 需要指出的是, 为了提高放大链的能量提取率, 神光 II 升级装置采用了方形光束. 由图 7 可以看出, 其远场图样为明显的方形光束的夫琅禾费衍射图样, 其中心定位算法见文献 [19]. 图 8 给出了准直完成后的数据结果,  $(x_p, y_p)$  和  $(x_j, y_j)$  分别对应于光栅基准的中心位置和焦斑的中心位置, 横坐标表示第  $n$  次准直, 纵坐标表示对应次准直完成后的基

准坐标和焦斑中心坐标.  $x_j$  相对于  $x_p$  的偏离和  $y_j$  相对于  $y_p$  的偏离分别反映了准直完成后焦斑中心在  $x$  方向和  $y$  方向相对于基准的偏移. 其测量过程如下: 首先移入光栅并使其精确复位, 依次计算光栅基准位置和焦斑中心位置, 根据其偏差值反复调整远场反射镜  $M_2$  (见图 1), 使焦斑中心和基准中心偏差小于某一值后完成准直过程, 计算基准中心和焦斑中心并记录数据. 每隔 10 min 重复一次准直过程, 共记录 20 组数据. 由图 8 可以看出, 在整个实验过程中基准位置非常稳定, 其波动远小于 1 个像素. 焦斑相对于基准的偏差最大为 1.25 个像素, 对应于  $10 \mu\text{m}$ . 表 1 给出了准直结果的统计值 (以像

素为单位),其中均方差反映了在整个测试过程中基准的抖动程度和焦斑抖动程度.从表1可以看出:光栅基准相对非常稳定, $x$ 方向为0.02个像素,对应于 $0.16\ \mu\text{m}$ , $y$ 方向为0.074个像素,对应于 $0.59\ \mu\text{m}$ ;焦斑中心 $x$ 方向和 $y$ 方向分别为0.46和0.54个像素,对应于 $3.68$ 和 $4.32\ \mu\text{m}$ .最大偏差定

义为焦斑中心和基准中心偏离的最大值, $x$ 和 $y$ 方向分别为0.44和1.25个像素,对应于 $3.52$ 和 $10.00\ \mu\text{m}$ .均值偏差定义为焦斑中心和基准中心偏差的均值, $x$ 方向和 $y$ 方向分别为0.28和0.51个像素,对应于 $2.24$ 和 $4.08\ \mu\text{m}$ .

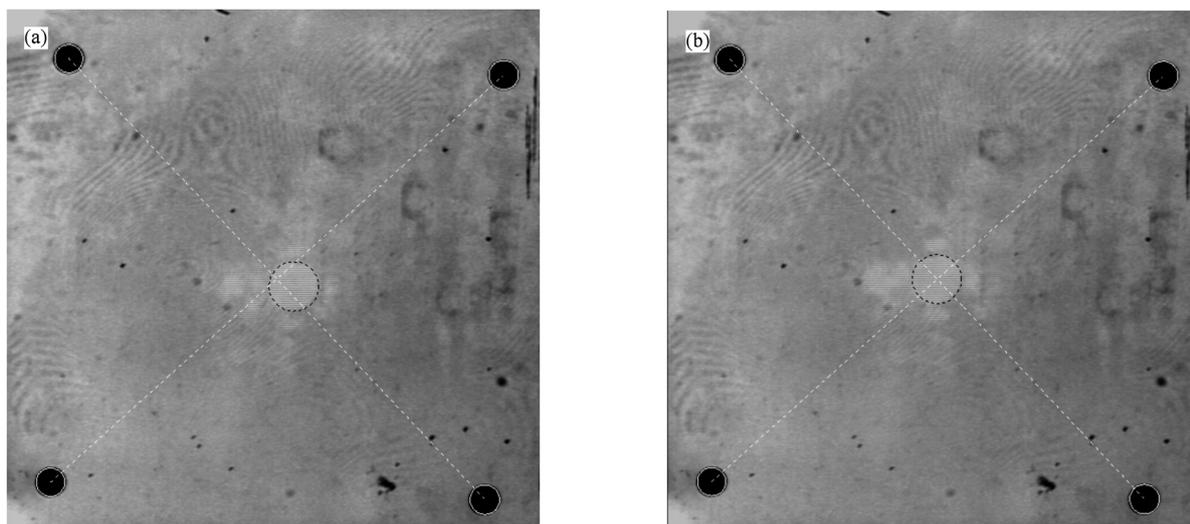


图7 远场取样准直图 (a) 焦斑与基准存在偏差,(b) 准直完成之后

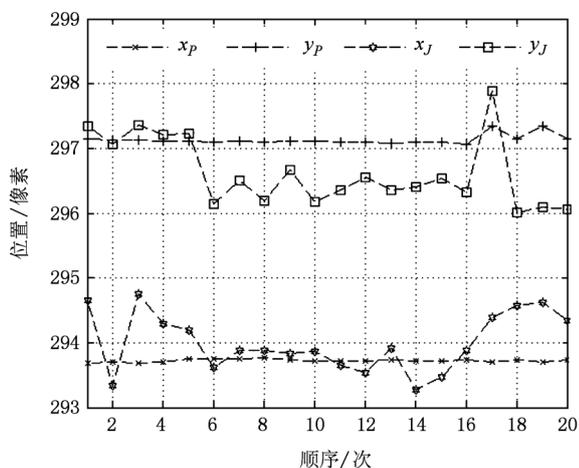


图8 远场准直结果

由于上述系统对于基准和焦斑是同时取样,获取的是相对位置信息,可以极大降低成像系统不稳定性引入的误差,从而保证了较高的取样准直精度.

表1 准直结果统计值

	$x_p$	$x_J$	$y_p$	$y_J$
均值	293.7222	294.0004	297.1346	296.6222
均方差	0.0203	0.4562	0.0739	0.5376
最大偏差	0.4402	0.4402	1.2547	1.2547
均值偏差	0.2782	0.2782	0.5124	0.5124

#### 4. 结 论

介绍了基于衍射光栅取样的高精度、模块化的远场准直方式.经过巧妙的光栅制作和照明成像系统设计,实现了基准与取样功能的融合.此系统在神光II升级装置预放系统的初步应用中达到了很高的取样和准直精度,光栅基准的复位精度优于 $8\ \mu\text{m}$ ,远场准直的焦斑定位精度优于 $10\ \mu\text{m}$ ,完全能够满足系统的设计要求.

- [1] Waxer L J, Maywar D N, Kelly J H, Kessler T J, Kruschwitz B E, Loucks S J, McCrory R L, Meyerhofer D D, Morse S F B, Stoeckl C, Zuegel J D 2005 *Opt. Photon. News* **16** 30
- [2] Qiao J, Kalb A, Guardalben M J, King G, Canning D, Kelly J H 2007 *Opt. Express* **15** 9562
- [3] Awwal A A S, McClay W A, Ferguson W S, Candy J V, Salmon T, Wegner P 2006 *Appl. Opt.* **45** 3038
- [4] Awwal A A S, Rice K L, Taha T M 2009 *Appl. Opt.* **48** 5190
- [5] Baker K L, Homoelle D, Utternback E, Stappaerts E A, Siders C W, Barty C P J 2009 *Opt. Express* **17** 16696
- [6] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, Bowers M W, Dixit S N, Erbert G V, Heestand G M, Hennesian M A, Hermann M R, Jancaitis K S, Manes K R, Marshall C D, Mehta N C, Menapace J, Moses E, Murray J R, Nostrand M C, Orth C D, Patterson R, Sacks R A, Shaw M J, Spaeth M, Sutton S B, Williams W H, Widmayer C C, White R K, Yang S T, Wouterghem B M V 2007 *Appl. Opt.* **46** 3276
- [7] Fleurot N, Cavailler C, Bourgade J L 2005 *Fusion Eng. Des.* **74** 147
- [8] Gao Y Q, Zhu B Q, Liu D Z, Liu X F, Lin Z Q 2009 *Appl. Opt.* **48** 1591
- [9] Gao Y Q, Zhu B Q, Liu D Z, Peng Z Y, Lin Z Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6992 (in Chinese) [高妍琦、朱宝强、刘代中、彭曾云、林尊琪 2008 物理学报 **57** 6992]
- [10] Deng W, Jiang D B, Jing F, Wang F, Zhang Q Q, Zhu Q H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5277 (in Chinese) [邓武、蒋东镛、景峰、王方、张清泉、朱启华 2006 物理学报 **55** 5277]
- [11] Huang X J, Huang Z, Wang X, Zeng X M, Zhang Y, Zhao L, Zhou K N, Zuo Y L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8264 (in Chinese) [黄小军、黄征、王道、曾小明、张颖、赵磊、周凯南、左言磊 2009 物理学报 **58** 8264]
- [12] Zacharias R A, Beer N R, Bliss E S, Burkhart S C, Cohen S J, Sutton S B, Atta R L V, Winters S E, Salmon J T, Stolz C J, Pigg D C, Arnold T J 2004 *Opt. Eng.* **43** 2873
- [13] Celliers P M, Estabrook K G, Wallace R J, Murray J E, Silva L B D, MacGowan B J, Wouterghem B M V, Manes K R 1998 *Appl. Opt.* **37** 2371
- [14] Potemkin A K, Barmashova T V, Kirsanov A V, Martyanov M A, Khazanov E A, Shaykin A A 2007 *Appl. Opt.* **46** 4423
- [15] Gao Y Q, Zhu B Q, Liu D Z, Lin Z Q 2009 *J. Opt. Soc. Am. A* **26** 2139
- [16] Hunt J T, Glaze J A, Simmons W W, Renard P A 1978 *Appl. Opt.* **17** 2053
- [17] Gao Y Q, Zhu B Q, Liu D Z, Lin Z Q 2009 *Opt. Express* **17** 12753
- [18] Garanin S G, Epatko I V, L'vov L V, Serov R V, Sukharev S A 2007 *Quantum Electron* **37** 1159
- [19] Gao Y Q, Zhu B Q, Liu D Z, Liu X F, Lin Z Q 2009 *Chin. Phys. B* **18** 215

## Far field auto-alignment system used in SG- II -Up system\*

Gao Yan-Qi Zhu Bao-Qiang Liu Dai-Zhong Peng Zeng-Yun Lin Zun-Qi

(Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Shanghai 201800, China)

(Received 30 June 2010; revised manuscript received 9 August 2010)

### Abstract

The auto alignment system, which is used for the beam adjustment in high power laser system, is not only the key subsystem ensuring the routine operation effectually and safely, but also the key element involved in improving the far-field and near-field beam quality. Based on a skillful design of the grating and illumination-image system, a far field alignment system is realized. This system, which is based on a diffraction function of the grating, is characterized by the high performance and the simultaneous off-axis sample of the focus and the reference. The results, which are obtained when the system is used in pre-amplifier system of the SG- II -Up, show that the reposition accuracy of the grating reference is better than  $8\mu\text{m}$ , the jitter amplitude is less than  $0.59\mu\text{m}$ . After the alignment, the deviation of the beam focus from the grating reference is no more than  $10\mu\text{m}$ .

**Keywords:** laser, optical systems for lasers, spatial filters

**PACS:** 52.57.-z, 42.60.-v, 42.79.Ci

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 007SQ804), the Japan-Korea-China Cooperative Project on "High Energy Density Science for Laser Fusion Energy", and the Large-Scale Scientific Facility Maintenance and Reconstruction Fund of Chinese Academy of Sciences.

† Corresponding author. E-mail: baoqzhu@siom.ac.cn