

文章编号: 0253-2239(2003)05-0593-05

# 新型阵列式片状放大器全口径增益分布均匀性 实验研究\*

王成程 於海武 贺少勃 刘 勇 唐 军 魏晓峰 郑万国 张小民

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心高温高密度等离子体物理国家级重点实验室, 绵阳 621900)

杨泽平 段海峰 李恩德 王海英 张雨东

(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

**摘要:** 利用 CCD 增益测试系统对一台闪光灯抽运、通光口径为 29 cm×29 cm 的新型高功率固体激光阵列式片状放大器的增益分布进行了实验测试, 在充电电压为 23 kV、抽运能密度为 11 J/cm<sup>2</sup> 的条件下, 新型 4×2×3 阵列式片状放大器全口径范围内的小信号增益系数的峰值与平均值之比为 1.10:1。

**关键词:** 激光物理; 阵列式片状放大器; 增益均匀性; 软边光阑; 小信号增益系数

中图分类号: TN248 文献标识码: A

## 1 引 言

在高功率固体激光片状放大器的工作过程中, 增益特性是衡量放大器性能的重要参量之一, 增益特性包括小信号增益系数和增益分布均匀性两个方面。对于特定结构的放大器, 小信号增益系数的大小决定了放大器增益能力的高低; 增益分布均匀性的好坏对总体输出光束的质量有很大的影响, 包括光束近场以及增益介质储能的可提取效率等。它定义为光束全口径上小信号增益系数的峰值与平均值之比。放大器增益分布的不均匀, 将使工作物质产生非球面透镜效应和应力分布, 造成激光束波面的严重畸变和偏振态的显著破坏, 特别是它使光束的空间强度和相位产生扰动, 经非线性介质中的传输, 扰动迅速增大, 致使光束小尺寸自聚焦, 甚至对光路中的光学元件造成毁灭性的破坏, 因此提高增益分布的均匀性对降低自聚焦效应的影响具有十分重要的意义。

国内外放大器物理特性的研究表明<sup>[1~3]</sup>, 提高放大器增益分布均匀性的方法主要有以下几种: 采用新型磷酸盐激光玻璃作为放大器的增益介质, 并将钕玻璃片制成矩形片, 能够更加有效地吸收氙灯光能, 减小氙灯自吸收份额, 并采取有效措施抑制钕玻璃片内放大的自发辐射 (ASE), 美国利弗莫尔

(LLNL) 实验室的研究结果表明, 钕玻璃片内的放大的自发辐射将显著地降低钕玻璃的储能, 特别是当  $\alpha l > 3$  时 ( $\alpha$  为线性吸收系数,  $l$  为光束经过的增益介质长度), 片内的放大的自发辐射更为严重, 并且将显著地影响放大器增益分布的均匀性; 另外一种办法就是对抽运腔进行优化设计, 提高氙灯光利用率, 如采用阵列式放大器结构、合理形状的聚光腔反射器, 提高聚光腔传输效率, 改善抽运光分布的均匀性。

片状放大器系统是我国新一代激光驱动器最重要的组成部分, 为此, 在激光装置总体需求带动下, 我们深入开展了片状激光放大器的物理研究。在单口径片状放大器 (SSA) 的实验研究过程中<sup>[4]</sup>, 利用多点探针光测量了放大器全口径的小信号增益系数分布情况, 但由于实验过程中相邻两次发射之间随机性, 导致多点测量的方法不能准确反应出放大器全口径范围内的增益分布情况。为了考核新型阵列式片状放大器的性能, 为原型装置放大器的建造提供必要的实验数据, 我们在 4×2×3 阵列式片状放大器模块上利用科学级 CCD 相机对放大器全口径的增益分布情况进行了实验测量, 并取得了有意义的实验结果。

## 2 实验装置及原理

实验装置主要由调 Q Nd:YLF 激光器、光学系统、放大器增益均匀性测试系统等几个单元组成,

\* 国家 863 计划惯性约束聚变领域重点资助课题。

E-mail: wangchch\_cacp@yahoo.com.cn

收稿日期: 2002-04-25; 收到修改稿日期: 2002-06-10

图1为测量系统光路示意图。为了保证探针光束的空间均匀性,系统设计中采用了光束分段整形的方法,即首先将调Q Nd:YLF激光器输出的激光脉冲进行空间整形,以便得到一个空间分布光滑无调制的光束,再采用软边光阑与像传递技术,将光束逐级扩束到测量所需要的范围。光学系统主要由三台空间滤波器、软边光阑和反射镜等元器件组成,P为起偏器,X为旋光晶体,FR为用来隔离反向传输激光

束的磁光隔离器。光阑  $D_1$  和空间滤波器  $SF_1$  组成前级光束整形单元,软边光阑  $D_2$  是整个像传递光学系统的成像光阑。为了避免在光路中放置分光镜会造成光束的相干叠加,影响测量的准确性,在光路中使用了两块劈板来对光束的近场进行取样,通过它可以把经过扩束空间滤波器  $SF_2$  和由空间滤波器  $SF_3$  返回的光束波面准确地传递到  $CCD_1$  和  $CCD_2$  相机上,保证光束的质量和测量的精度。

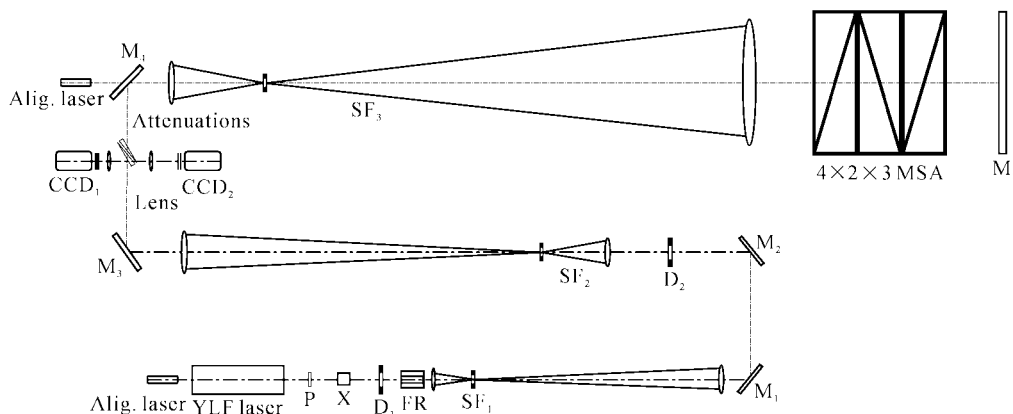


Fig. 1 Schematic drawing of the optical measurement system for  $4 \times 2 \times 3$  multi-slab-amplifier

为了保证测量的准确性,采用了相对测量的方法。根据光束的等相位面传输特性,合理设置相机  $CCD_1$ 、 $CCD_2$  在光路中的位置,以保证两台 CCD 测量的是光路中的同一个相面。相机  $CCD_1$ 、 $CCD_2$  分别取样测量放大器的输入、输出光强。若设输入相机  $CCD_1$  光束的光强矩阵为  $I_1$ ,经  $4 \times 2 \times 3$  放大器两次放大后输入相机  $CCD_2$  光束的光强矩阵为  $I_2$ ,则  $4 \times 2 \times 3$  放大器的小信号增益  $g$  矩阵可以由(1)式求出:

$$g = \frac{(I_2 - I'_2)/(I_1 - I'_1)}{I_{20}/I_{10}}, \quad (1)$$

其中  $I'_2$ 、 $I'_1$  为放大器正常工作时的背景光强矩阵,即氙灯光本底; $I_{20}/I_{10}$  为放大器未工作时的静态光强矩阵比值,即相机定标系数矩阵。小信号增益系数  $\beta$  矩阵与小信号增益  $g$  矩阵之间的关系为<sup>[4]</sup>

$$\beta = \frac{n}{t \sqrt{1+n^2}} \ln g + \alpha, \quad (2)$$

式中, $n$  为铍玻璃的折射率, $t$ (单位为 cm) 为铍玻璃片的总厚度, $\alpha$  为铍玻璃片的动态损耗系数。知道了通过放大器前后的光强矩阵比值,就可以得到小信号增益系数  $\beta$  的矩阵分布。

由此  $4 \times 2 \times 3$  片状放大器增益分布的均匀性  $U$  可以由下式计算得到

$$U = \beta_{\max}/\beta_{\text{mean}}. \quad (3)$$

### 3 实验研究

实验过程分为四个部分:首先,利用 TDS644 示波器和强流管对氙灯光和激光信号进行同步调节;第二步是对实验过程中使用的 CCD 相机进行相对定标;第三步是测量动态情况下放大器的氙灯光本底;最后是放大器小信号增益分布的测量。测试过程中,用干涉滤光片遮住相机 CCD 的通光口径,这样做的主要目的是消除杂散光的影响。

#### 3.1 CCD 相机线性动态范围定标

CCD 作为光电转换器件,通过输出的灰度值反映输入的光能量,因此,在用 CCD 测量系统的增益系数时,需对 CCD 的线性动态响应范围进行标定。根据夫琅和费圆孔衍射原理对两台 CCD 进行了现场标定。在标定中,将 CCD 的靶面调整到与傅里叶透镜的焦平面重合,采集  $1.053 \mu\text{m}$  波长的激光经小孔衍射后在焦面的能量分布,通过 CCD 输出的灰度值与小孔衍射光强的理论分布比较,即可实现 CCD 对  $1.053 \mu\text{m}$  波长激光的动态响应曲线的确定。图 2 为  $CCD_1$ 、 $CCD_2$  的动态响应曲线标定结果。图 2 中  $I_0$  为衍射远场的零级谱极大强度, $I$  为圆孔衍射光强的远场分布。

标定结果表明,CCD 线性动态范围(可用区域)约为  $500 \sim 3800$ (7.6 倍), $4 \times 2 \times 3$  放大器一个模块小信号的单程总增益约为  $1.2 \sim 1.4$  倍,而 CCD 相

机灰度值静态输出的平均值为 1000, 因此两台 CCD 相机的线性动态范围可以满足一个模块的测量要求。为了保证测量结果的准确性, 对放大器的端部

模块和内部模块分别进行单独测量, 并且通过调整这两台 CCD 相机前的衰减片, 使 CCD 工作在线性区, 以便保证测量精度。

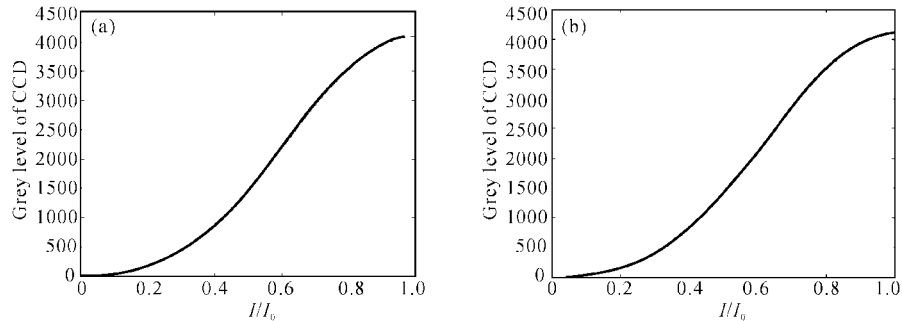


Fig. 2 Linearly dynamics curve plot of CCD cameras. (a) CCD<sub>1</sub>; (b) CCD<sub>2</sub>

### 3.2 CCD 相机静态定标

在相对测量过程中, 首先要对系统的静态情况进行测试, 以便消除测量过程中的系统误差。我们采用了多次测量取平均值的办法来确定系统的静态情况。同时, 由于在两个图像光斑相除的过程中, 图像处理采用了点对点相除的方法。因此, 保证 CCD 相机测得的两个图像光斑精确对位, 对测量结果的准确性至关重要。

在图像对位过程中采取了“针尖对位”的方法 (美国 LLNL 实验室在 Beamlet 装置放大器增益分布测量过程中采用了交叉叉丝的对位方法<sup>[5,6]</sup>), 具体情况见图 3 所示 (由于光路系统结构原因, 相机 CCD<sub>2</sub> 测量的光斑相对于 CCD<sub>1</sub> 有一个以水平方向为轴的镜像变化)。在图像处理过程中, 精确对准两个方向放置的针尖位置, 就可以保证测量结果的准确性。

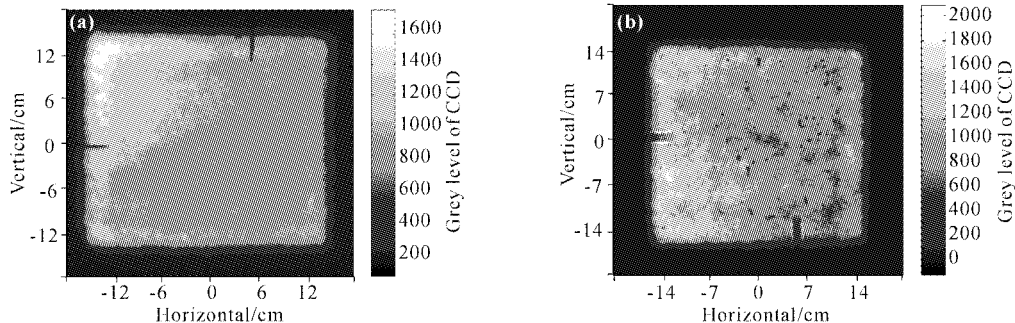


Fig. 3 Pinpoint site of CCD cameras images. (a) Input beam; (b) Output beam

### 3.3 氙灯光本底测试

由于 CCD 相机工作时测量的光能量为  $10^{-9}$  J 量级范围, 因此对放大器氙灯光本底进行了仔细的

测量, 以便确定氙灯光本底在动态测量结果中所占的份额。两台 CCD 相机测量的本底情况如图 4 所示。

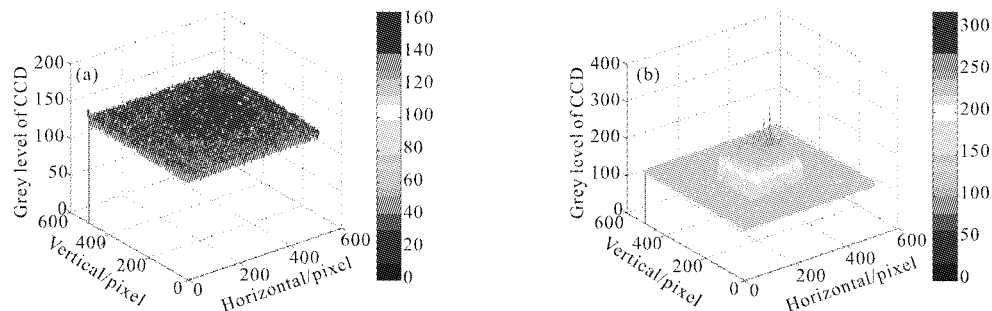


Fig. 4 Experimental result of flashlamp light. (a) CCD<sub>1</sub> camera; (b) CCD<sub>2</sub> camera

### 3.4 放大器小信号增益分布均匀性测试

实验过程中,使用的软边光阑口径为  $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ ,经过空间滤波器系统扩束后对应待测放大器的通光口径为  $29\text{ cm} \times 29\text{ cm}$ 。实验结果扣除了

氙灯光本底,并将磷酸盐钽玻璃片的动态损耗计为  $0.0045\text{ cm}^{-1}$ ,放大器全口径范围内内部模块的小信号增益系数分布情况如表 1 和图 5 所示。

Table 1. Small signal gain coefficient distribution of interior module of  $4 \times 2 \times 3$  multi-segment-amplifier

Charge voltage /kV	Delay / $\mu\text{s}$	$g_{\text{mean}}$	$g_{\text{max}}$	$U_g$	$\beta_{\text{mean}}/\text{cm}^{-1}$	$\beta_{\text{max}}/\text{cm}^{-1}$	$U_\beta$
22.9	590	1.234	1.286	1.04	0.048	0.054	1.12
23.0	604	1.245	1.280	1.03	0.051	0.056	1.10

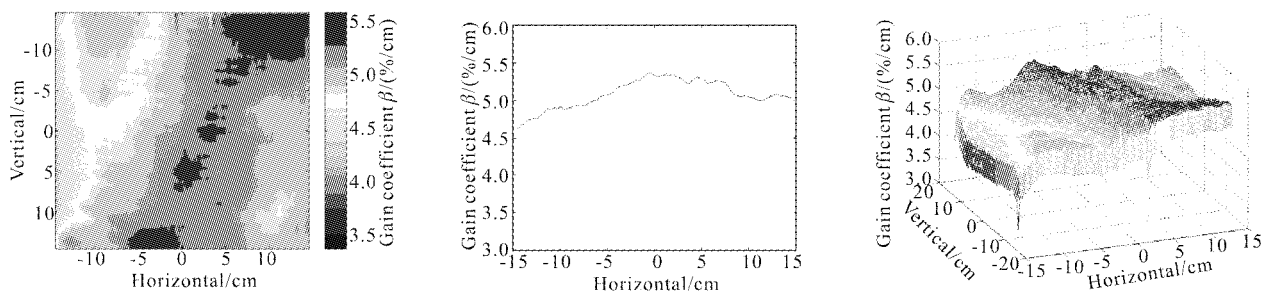


Fig. 5 Small signal gain coefficient distribution in full aperture of  $4 \times 2 \times 3$  multi-segment-amplifier

## 4 实验结果及讨论

由表 1 和图 5 可以看出,在放大器全口径范围内,小信号增益的分布在 X 方向中心较高,边缘相对偏低。产生这一现象的原因可以从放大器增益介质的工作机理和抽运腔的结构中得到。事实上影响放大器增益分布的因素是很多的,如抽运腔内氙灯光的分布、钽玻璃片内放大的自发辐射现象的存在<sup>[7]</sup>、抽运热效应的影响、钽玻璃片通光方向上透过率的差异等。在这些因素中,传输增益的均匀性主要是由通过片的氙灯光的分布和放大的自发辐射的影响来决定的。由于片状放大器采用了沿光轴方向呈锯齿形排布的钽玻璃片,沿光轴方向纵向排列的多灯抽运,片是面抽运的,因此抽运光在腔内的分布比较均匀。理论分析表明,增益分布的不均匀主要源于放大器钽玻璃片中存在的放大的自发辐射的影响,当放大器的口径较大时,放大的自发辐射的影响是很大的。放大的自发辐射的存在导致了钽玻璃片在片的边缘地区增益的退抽运,并优先耗尽了介质的高能态粒子。

由以上实验数据,可以很容易得到在 23 kV 工作电压下, $4 \times 2 \times 3$  片状放大器内部模块小信号增益分布均匀性的测量结果。放大器内部模块的小信号增益分布均匀性为: $U_g = 1.03:1$ 、 $U_\beta = 1.10:1$ 。由于  $4 \times 2 \times 3$  阵列式片状放大器组件采用了新型的模块化结构设计,抽运腔结构与文献[4,5]介绍的

SSA 单口径片状放大器有着很大的区别,抽运能密度相对较低。在新型抽运腔结构实验条件下,采用 CCD 相机测量放大器全口径范围内的小信号增益系数的方法避免了以往单次探针光测量时的随机性,在更广泛的范围内准确测量了放大器全口径方向上的小信号增益系数分布情况,获得了衡量放大器性能的重要技术参量,为我国新一代高功率固体激光驱动器的建造提供了重要的参考依据。

在完成本项研究工作的过程中,作者与中物院激光聚变研究中心激光技术工程部陈波同志进行了有益的讨论,在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- Zheng W G, He S B, Zhang X M *et al.*. Development progress for amplifier of SG-III facility. *Proc. SPIE*, 1998, **3492**:586~591
- Erlanson A C, Lambert H, Zapata L E *et al.*. The effect of amplifier component maintenance on laser system availability and reliability for the US National Ignition Facility. *Proc. SPIE*, 1996, **3047**:138~147
- Erlanson A C, Alger T, Horvath J *et al.*. Flashlamp-pumped Nd: glass amplifiers for the national ignition facility. *Fusion Technology*, 1998, **34**(11):1105~1111
- Wang Chengcheng, Zheng Wanguo, Yu Haiwu *et al.*. Research of gain uniformity in large aperture slab amplifier. *Chinese J. Laser* (中国激光), 2001, **A28**(4): 355~358 (in Chinese)
- Rotter M, McCracken R. Al erlanson gain measurement on a prototype NIF/LMJ amplifier pump cavity. *Proc. SPIE*, 1996, **3047**:178~187
- Zapata L E, McCracken R, Horvath J *et al.*. Large

aperture diagnostic system for gain and wavefront measurements on NIF/LMJ amplifiers. *Proc. SPIE*, 1996, **3047**:643~648

程). Transl. *Hua Guang*, Beijing: Scientific Press, 1991. 628~642 (in Chinese)

7 Koechner W. *Solid-State Laser Engineering* (固体激光工

## Gain Distribution Uniformity in Full Aperture of a New Multi-Segment-Amplifier

Wang Chengcheng Yu Haiwu He Shaobo Liu Yong Tang Jun Wei Xiaofeng  
Zheng Wan'guo Zhang Xiaomin

(*Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900*)

Yang Zeping Duan Haifeng Li Ende Wang Haiying Zhang Yudong  
(*Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209*)

(Received 25 April 2002; revised 10 June 2002)

**Abstract:** By using the CCD test system of gain distribution uniformity, the gain distribution uniformity of a new high power solid-state laser multi-segment-amplifier pumped by flashlamp was measured experimentally. Under the condition of charge voltage of 23 kV and pumping energy density of  $11 \text{ J/cm}^3$ , the small signal gain coefficient distribution uniformity in full aperture of  $4 \times 2 \times 3$  multi-segment-amplifier is  $1.10 \pm 1$ .

**Key words:** laser physics; multi-segment-amplifier; gain distribution uniformity; soft aperture slot; small signal gain coefficient