

大口径片状放大器增益均匀性测量方法研究

郝欣 陈林 陈远斌* 刘建国 刘勇 赵军普 梁樾 唐军 李森 陈德怀

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 利用大口径高通量实验平台,同时使用科学光电耦合器件(CCD)和哈特曼测量了大口径片状放大器增益均匀性,并针对这两种测量方法提出了几种相应的处理方法,通过数值计算和分析,详细比较了不同测量方法和后期处理方法对增益均匀性产生的影响,确定了两种测量方法及其后期处理方法的有效性。结果表明,使用科学 CCD 测量增益均匀性,数据处理时采用多发次求平均再匀滑的方法既可规避测量产生的随机性,又进一步减小了增益分布的空间噪音;使用哈特曼测量增益均匀性,尽量使用点阵超过 50×50 的哈特曼,微透镜阵列点阵数量过少会降低增益塌边程度。

关键词 测量;大口径片状放大器;增益均匀性;测量方法

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s108001

Research on the Measurement Methods for the Gain Distribution Uniformity of Large Aperture Slab Amplifiers

Hao Xin Chen Lin Chen Yuanbin Liu Jianguo Liu Yong Zhao Junpu
Liang Yue Tang Jun Li Sen Chen Dehuai

(Research Centre of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Utilizing the scientific charge-coupled device (CCD) and Hartmann test system, the gain distribution uniformity of large aperture slab amplifiers is measured on the integration test bed and processing methods are put forward for these two methods. The effects of various measuring methods and post-processing methods on gain uniformity are compared in detail by numerical calculation and analysis. The results show that the measuring randomness can be avoided and spatial noise of gain distribution can be minimized when measuring the gain uniformity by the scientific CCD with multi-shot averaging smoothed method. The results also show that less lattice number reduces the gain roll-off at the edges of the aperture when measuring the gain uniformity by Hartmann, which indicates a lattice number of over 50×50 is proposed.

Key words measurement; large aperture slab amplifiers; gain uniformity; measurement method

OCIS codes 140.3280; 140.3580

1 引言

对于高功率固体激光片状放大器,增益特性是评估放大器性能的重要技术指标之一^[1-5]。增益特性包括增益和增益均匀性,增益大小直接决定了放大器增益能力,增益均匀性^[6-7]为光束通光口径上增益最大值与平均值之比,它对于整个激光装置的光束质量、光强近场空间^[8]分布影响极大。准确获知大口径片状放大器增益均匀性,对于提升有效口径内的增益介质储能,提高数值模拟、预测片状放大器增益分布的能力和置信度,都起着至关重要的作用。

王成程等^[7]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映出放大器全口径范围内的增益分布情况。为了规避发次间的随机性,随后,他们利用科学光电耦合器件(CCD)相机对放大器全口径的增益分布情况进行了实验测量^[9],但科学 CCD 测量会引入电子噪声等高频噪音,且存在数据处理时输入、输出近场像素点需要精确地一一对应等难点。美国国家点火装置(NIF)相关文献报道^[4],采用常规的噪音

收稿日期: 2013-10-23; 收到修改稿日期: 2013-12-03

作者简介: 郝欣(1985—),女,助理研究员,主要从事固体激光放大器技术方面的研究。E-mail: xinh19@126.com

*通信联系人。E-mail: cybdlf@163.com

滤除方法(如傅里叶滤波法)虽然能剔除高频噪声,但也会使增益边缘的塌边现象失真。为解决此问题,本文针对 CCD 测量方法采取了几种相应的处理方法,详细描述、分析比较不同处理方法对增益均匀性产生的影响,并通过对比给出了 CCD 测量时最佳处理方法;哈特曼测量具有方法数据处理时不需要像素点的一一对应,且不会引入高频噪音的优点,但增益均匀性的置信度受到微透镜阵列点阵数量的影响,通过计算分析给出了哈特曼测量时需采用的微透镜点阵数量,为今后采用不同方法测量大口径片状放大器增益均匀性和处理增益分布提供了参考。

2 实验测量光路

在大口径高通量实验平台(ITB)上使用预放、主放诊断系统的科学 CCD 和哈特曼同时测量了大口径片状放大器增益分布情况,获得了光束口径 $375\text{ mm} \times 375\text{ mm}$ 增益均匀性的结果。为了得到最大可测量口径的增益分布情况(ITB 最大运行口径

$360\text{ mm} \times 360\text{ mm}$),避免原光路变口径离轴放大引入测量误差,对 ITB 实验光路进行了一系列改动(诸如:更改主放注入透镜对的位置和扩束比、更改预放补偿液晶光阑的口径大小、改变主放注入镜的放置位置),实际测量光路如图 1(a) 蓝线所示。预放探针光经主放注入镜由 CSF 孔直接注入助推放大器 AMP2(按 10:1 分光比,分光注入预放诊断系统,用于测量激光输入参数),通过高反镜 M1、M2、透镜 L3,经 TSF 4 孔、透镜 L4 与取样劈板 WSP(分光比为 1000:1),进入主放诊断系统(用于测量激光输出参数)。预放诊断包、主放诊断包内都放置了一台 CCD 和一台哈特曼,用于测量输入、输出近场分布的同时,可进行 CCD 测量系统和哈特曼测量系统测量片状放大器增益分布情况的对比实验。图 1(b) 所示为探针光在助推放大器 AMP2 口径上的分布区域,大小是 $375\text{ mm} \times 375\text{ mm}$,钎玻璃口径大小为 $410\text{ mm} \times 410\text{ mm}$ 。

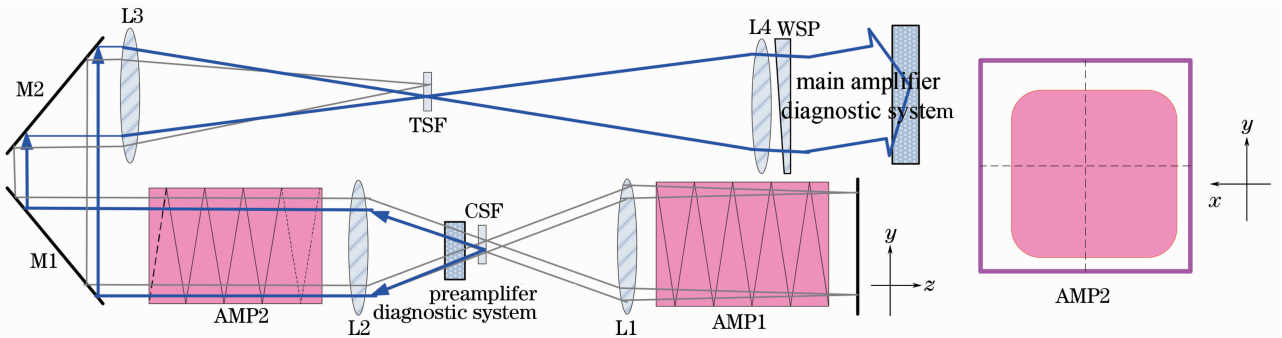


图 1 (a) 测量光路示意图; (b) 探针光在助推放大器 AMP2 口径上的等效分布区域

Fig. 1 (a) Schematic illustration of the optical measurement system; (b) distribution of optic beam on the AMP2 aperture

3 CCD 测量原理以及处理方法

3.1 CCD 测量增益均匀性的原理

用预放诊断包与主放诊断包的两台 CCD 分别测量片状放大器的输入和输出近场分布。测量前,首先在输入处放置十字叉丝,并记录其在两台 CCD 上的位置,以便图像处理时能实现输入、输出近场像素点的一一对应;其次,测量静态(放大器氙灯不工作,只有探针光经过)时的放大器的输入近场 E_{in1} 与输出近场 E_{out1} ;然后测量本底,即氙灯光对两台 CCD 的影响 E_{inb} 和 E_{outb} ,此时探针光不通过放大器但放大器氙灯正常工作;最后测量动态(探针激光通过放大器且放大器氙灯正常工作)时的放大器的输入近场 E_{in2} 和输出近场 E_{out2} 。以上 6 幅近场图像经十字叉丝精确校正对准之后,由下式可得放大器的

增益分布 G :

$$G = \frac{(E_{out2} - E_{outb}) / (E_{in2} - E_{inb})}{E_{out1} / E_{in1}} \quad (1)$$

每一测量像素点的增益系数 $\alpha_{i,j}$ 可表示为

$$\alpha_{i,j} = \frac{\lg G_{i,j}}{N_p N_s L} \quad (2)$$

式中 N_p 是通过的放大器的次数, N_s 是激光片的数量, L 是光束在放大器中的传播路程。由此可得片状放大器增益均匀性 U_a :

$$U_a = \alpha_{\max} / \alpha_{\text{mean}} \quad (3)$$

式中 α_{\max} 、 α_{mean} 分别为增益系数 $\alpha_{i,j}$ 矩阵中的最大值和平均值。通过上述方式,使用预放、主放诊断系统的 CCD 测量了 22 kV 主放测试电压下的增益分布情况,下文分析讨论所用数据皆为主放电压 22 kV 下的测量结果。

结合(1)、(2)式,利用 22 kV 工作点时 CCD 采集到的静态、动态、本底图像,获取了一张增益系数分布如图 2 所示(375 mm×375 mm 通光口径的增益系数分布情况), $U_a = 1.103:1$ 。从图中很明显发现原始增益系数测量结果中有许多由 CCD 测量引入的高频电子噪声,以及由于光学元件上的污点、光学系统的自身缺陷引入的衍射条纹、干涉条纹。这些高频噪声、毛刺的存在会对准确获知大口径片状放大器增益均匀性引入一定误差,必须要消除高频成分。下面介绍了两种处理方法,在消除高频成分同时不改变增益塌边的程度。

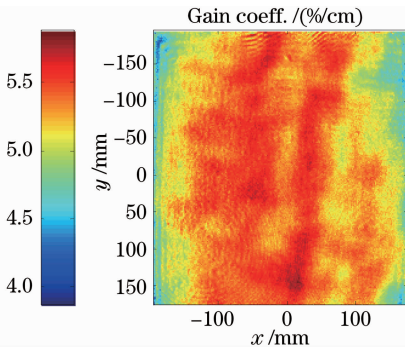


图 2 未处理过的增益分布图像

Fig. 2 Unprocessed gain coefficient profile

3.2 区域平均匀滑处理方法

区域平均匀滑处理方法,是通过将增益系数矩阵内部取一矩形区域,求矩形区域的平均增益来获取该区域中心点的平滑增益系数 $\alpha_{i,j}$,逐一像素地移动以 $\alpha_{i,j}$ 为中心点的矩形区域,完成对整个测量口径的平均匀滑处理。匀滑处理算法如图 3 所示,例如,像素点 (i,j) 处的平滑增益系数 $\alpha_{i,j}$ 为以点 (i,j) 为中心, $(i-M:i+M, j-N:j+N)$ 区域内所有像素点增益系数的平均值,其中 M,N 为设定的匀滑参数:

$$\alpha_{i,j} = \frac{1}{(2M+1)(2N+1)} \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \alpha_{i+n, j+m} \quad (4)$$

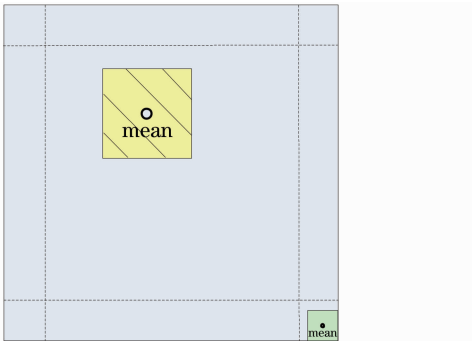


图 3 区域平均匀滑处理算法示意图

Fig. 3 Schematic illustration of averaging smoothed method

在口径中心,将匀滑参数 M,N 设为 12(每个匀滑区域面积相当于全口径面积的 0.2%,全口径像素点为 550×550)。当接近增益系数矩阵边缘时,为确保不影响边沿增益跌落的程度,将匀滑参数 M,N 设值减半,图 4 所示为匀滑后的增益系数分布结果。匀滑前增益均匀性为 $1.103:1$,平滑后增益均匀性为 $1.096:1$,该处理方法从数值上看来,对测量结果并无影响(仅小数点后第 3 位略有影响),从图像上比较,表明确实去除了噪音,而没有显著地影响口径边缘的增益塌边。

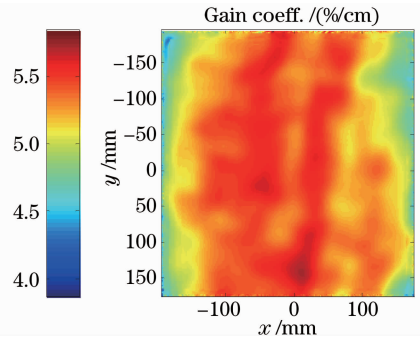


图 4 匀滑后的增益分布图像

Fig. 4 Gain coefficient profile after smoothed version

图 5 所示为 $X=0$ mm、100 mm 的原始增益及匀滑后的增益数据,虚线为匀滑前数据,实线为匀滑

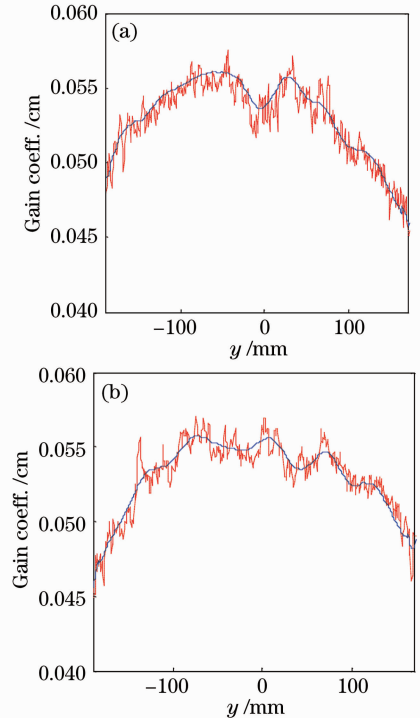


图 5 不同位置原始增益及平滑后的增益数据比较。

(a) $X=0$ mm; (b) $X=100$ mm

Fig. 5 Comparison of the raw and smoothed gain coefficient data. (a) $X=0$ mm; (b) $X=100$ mm

后数据,两条曲线拟合度较好,说明处理方法没有引入很大的误差。通过增益均匀性数值、图像以及不同位置的增益数据对比表明,区域平均匀滑处理方法可以有效去除高频成分并保持增益分布原貌,适用于 CCD 测量均匀性的方法。

3.3 多发次求平均再匀滑处理方法

多发次求平均再匀滑处理方法,是通过采集某个给定电压的多发次主放电增益系数求平均,再对平均后的增益结果进行匀滑处理的方法。该方法获

取的放大器实验增益分布更加精确,降低了单发数据的随机性。图 6(a)所示为利用该测量方案对 ITB 主放电电压为 22 kV 时,测 4 发次的平均增益系数分布,原始数据的增益均匀性为 1.092:1;图 6(b)所示为利用 3.2 节匀滑方法处理后的平均增益系数分布,增益均匀性为 1.088:1。结果表明,多发次求平均的匀滑方法在减小了增益分布空间噪音的同时,进一步规避测量结果的随机性、提高测量数据置信度。

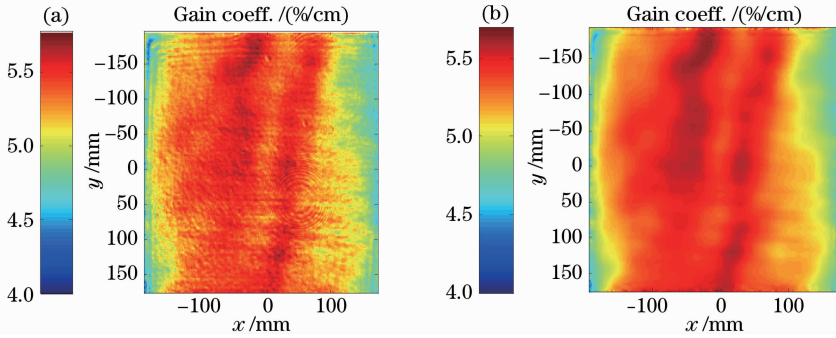


图 6 多发次求平均的增益分布。(a)原始数据图像;(b)区域平均匀滑处理后的图像

Fig. 6 Gain coefficient profile of multi-shot averaging smoothed method. (a) Raw version; (b) smoothed version

3.4 区域求和匀滑处理方法

区域求和匀滑方法,是将预放诊断包与主放诊断包的两台 CCD 采集到的输入、输出近场图像划分成若干矩阵,对每个小矩阵求和之后,再计算出增益分布图像,该方法如图 7 所示。该方法的优点是:1)不用严格的像素点间一一对应;2)计算出的增益分布图像不用进行二次处理,高频成分已经被匀滑掉。

继续使用 3.2 节所用同发次采集到的 CCD 数据。分别将 CCD 输入、输出近场采用三种方式进行划分,即 110×110 个矩阵(每个矩阵含 5×5 个像素点)、 55×55 个矩阵(每个矩阵含 10×10 个像素点)、 22×22 个矩阵(每个矩阵含 25×25 个像素点),然后

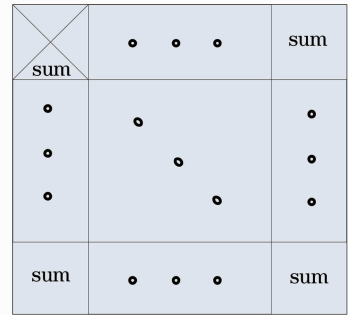


图 7 区域求和匀滑方法示意图

Fig. 7 Schematic illustration of sum smoothed method

对计算出的增益系数矩阵进行插值处理,得到如图 8 所示的增益分布图像,增益均匀性分别为 1.098:1,

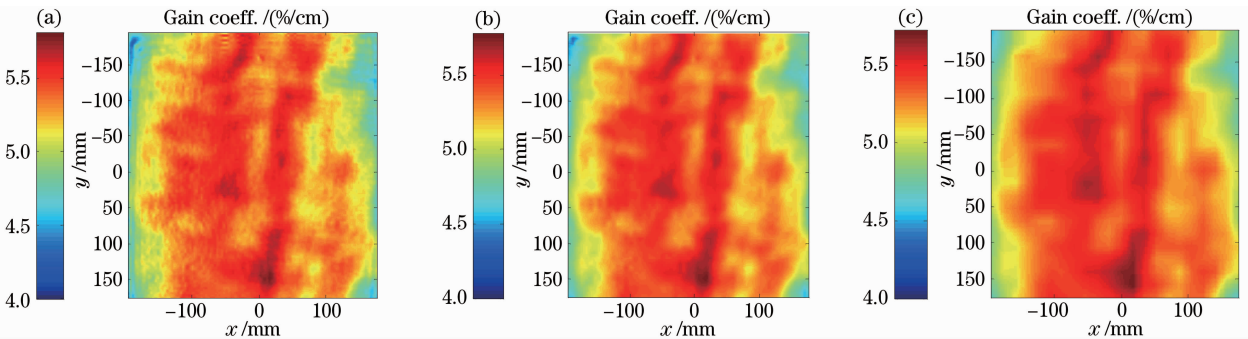


图 8 区域求和匀滑方法处理得到的增益分布图像。CCD 输入输出近场分别划分为(a) 110×110 个矩阵;(b) 55×55 个矩阵和(c) 22×22 个矩阵

Fig. 8 Gain coefficient profile of sum smoothed method. In order to simulate the gain coefficient profile, the matrix size of the image on both input and output CCD cameras is divided into (a) 110×110 , (b) 55×55 and (c) 22×22

1.094:1, 1.081:1。比较原始图像发现:区域划分过小,所包含的像素点太少时[图 8(a)],增益塌边的形貌没有改变,但部分噪音和干涉衍射条纹依然存在;区域划分过大,所包含的像素点太多时[图 8(c)],增益分布形貌保持不变,但增益塌边部分被匀滑掉了,导致增益均匀性数值下降。

从增益均匀性数值和图像易知,区域求和匀滑方法可以处理增益系数矩阵,但其有效性在一定程度上受到匀滑区域划分大小的限制,区域划分过小,不足以匀滑高频噪声,而区域划分过大又过分匀滑,导致增益均匀性数值下降。该匀滑处理方法亦可结合多发次求平均增益的方法,以降低单发数据的随机性,但总体上说来,该方法对增益塌边的影响主要来源于求和区域划分的大小。

4 哈特曼测量原理以及测量结果

4.1 哈特曼测量增益均匀性原理

哈特曼探测器由若干个微透镜阵列组成,它采集到的结果可视为将激光近场划分成若干区域(增益区域数量等于哈特曼微透镜阵列的数目),对区域内的激光能量求和,即求出每个微透镜聚焦的能量再计算增益分布。这种方法本质上与区域求和匀滑方法(如 3.4 节所述)相同,测量方法见图 9 所示。该方法的测量步骤与 CCD 法相似,需采集放大器静态、本底和动态三种状态下的输入输出近场。哈特曼测量方法较 CCD 测量方法的优点是:1)数据处理时不需要像素点的一一对应;2)不会引入高频噪音。

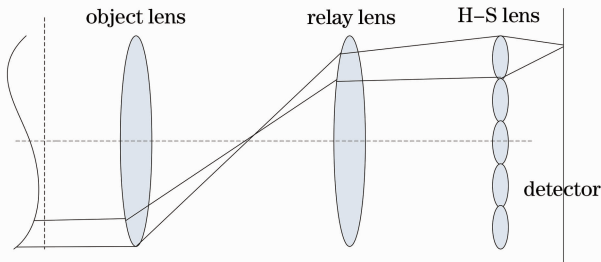


图 9 哈特曼测量方法示意图

Fig. 9 Schematic illustration of Hartmann measurement

4.2 测量结果

本次实验使用的哈特曼由 20×20 个微透镜阵列组成,图 10 为哈特曼测量方法采集、处理、插值得到的 3.2 节同发次主放电增益分布图像,该图像的增益均匀性为 1.075:1。从图像可以看出, 20×20 微透镜阵列的哈特曼测量的增益分布较 CCD 测量结果,增益强区和增益塌边形貌近乎一致,但塌边程度明显减弱,这一点也与 3.4 节数值计算的 22×22

微透镜阵列哈特曼预测结果高度一致。这说明哈特曼可以用于测量大口径片状放大器的增益分布,但同时根据 3.4 节数值计算 110×110 、 55×55 、 22×22 三种小矩阵划分的对比结果易知,本次实验所用的 20×20 个采样点数量较少,导致增益均匀性测量值较真实值偏低,为了提高测量结果的精确度建议哈特曼测量增益均匀性时,使用微透镜点阵数超过 50×50 的哈特曼为宜。

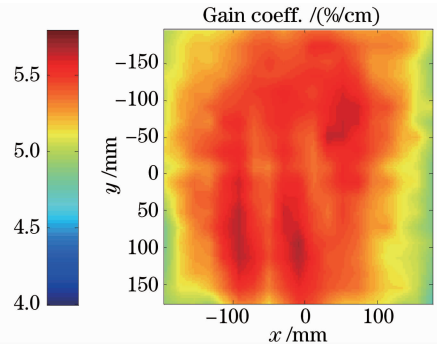


图 10 20×20 微透镜阵列组成的哈特曼采集、处理得到的增益分布图像

Fig. 10 Gain coefficient profile measured by the Hartmann with 20×20 Hartmann-Shack lenses

5 结 论

利用大口径高通量实验平台,同时使用科学 CCD 和哈特曼测量了大口径片状放大器增益分布情况,并针对这两种测量方法提出了几种相应的处理方法,通过实验测量和数值计算,详细比较了两种测量方法和其后期处理方法对增益均匀性产生的影响。结果表明,科学 CCD 和哈特曼都能测量大口径片状放大器增益均匀性。使用科学 CCD 测量增益均匀性,结果中有许多由 CCD 测量引入的高频电子噪音,且存在输入输出像素点需要精准一一对应的难点,数据处理时宜采用多发次求平均再匀滑的方法既可规避测量产生的随机性,又可进一步减小了增益分布的空间噪音;使用哈特曼测量增益均匀性具有数据处理简单且不会引入高频噪音的优点,但如果哈特曼所含的微透镜点阵数量过少则会降低增益塌边程度,导致增益均匀性测量值偏低,故建议采用哈特曼测量大口径片状放大器增益均匀性时使用微透镜点阵超过 50×50 的哈特曼为宜。

参 考 文 献

- 1 C Gamache, D Descamps, D Husson, *et al.*. Energy storage efficiency and small signal gain measurements in Nd: phosphate amplifiers[C]. SPIE, 1999, 3492: 752-760.

- 2 L E Zapata, R W McCracken, J A Horvath, *et al.*. Large aperture diagnostic system for gain and wavefront measurements on NIF/LMJ amplifiers[C]. SPIE, 1996, 3047: 643-648.
- 3 Mark D Rotter, Rick W McCracken, Alvin C Erlandson, *et al.*. Gain measurements on a prototype NIF/LMJ amplifier pump cavity[C]. SPIE, 1997, 3047: 178-187.
- 4 J T Hunt. National Ignition Facility Performance Review 1998 [R]. UCRL-ID-138120-98, 1999.
- 5 J T Hunt. National Ignition Facility Performance Review 1999 [R]. UCRL-ID-138120-99, 2000.
- 6 Wang Chengcheng, Zheng Wanguo, Yu Haiwu, *et al.*. Research of small signal gain character in large aperture square beam slab amplifiers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(2): 155-158.
王成程, 郑万国, 於海武, 等. 大口径方光束片状放大器小信号增益实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(2): 155-158.
- 7 Wang Chengcheng, Zheng Wanguo, Yu Haiwu, *et al.*. Research of gain uniformity in large aperture slab amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2001, A28(4): 355-358.
王成程, 郑万国, 於海武, 等. 大口径片状放大器增益均匀性实验研究[J]. 中国激光, 2001, A28(4): 355-358.
- 8 Wang Tao, Fan Dianyuan. Optimum design of fluence spatial distribution for a multipass amplifier[J]. Chinese J Lasers, 1999, A26(3): 289-293.
王 韬, 范滇元. 增益介质光性参数对高功率激光放大系统性能的影响[J]. 中国激光, 1999, A26(3): 289-293.
- 9 Wang Chengcheng, Yu Haiwu, He Shaobo, *et al.*. Gain distribution uniformity in full aperture of a new multi-segment-amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(5): 593-597.
王成程, 於海武, 贺少勃, 等. 新型阵列式片状放大器全口径增益分布均匀性实验研究[J]. 光学学报, 2003, 23(5): 593-597.

栏目编辑: 何卓铭