

文章编号: 0258-7025(2003)06-0489-05

# 新型阵列式片状放大器点探针光小信号增益实验研究

王成程, 於海武, 唐 军, 贺少勃, 刘 勇, 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, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 介绍了一台通光口径为  $29\text{ cm} \times 29\text{ cm}$  的新型高功率固体激光阵列式片状放大器, 并且在不同充电电压下进行了实验测试。在充电电压为  $23\text{ kV}$ , 抽运能量密度为  $10.0\text{ J/cm}^3$  的条件下, 获得了平均值为  $4.99\% \text{ cm}^{-1}$  的小信号增益系数和  $3.0\%$  的储能效率。

**关键词** 惯性约束聚变技术; 阵列式片状放大器; 磷酸盐激光玻璃; 小信号增益系数

中图分类号 TL 632+.1 文献标识码 A

## Research of Small Signal Gain by a Probe Beam in a New Multi-segment amplifier

WANG Cheng-cheng, YU Hai-wu, TANG Jun, HE Shao-bo,  
LIU Yong, WEI Xiao-feng, ZHENG Wan-guo, ZHANG Xiao-min

(Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** In this paper, a new high power solid-state laser multi-segment-amplifier with  $29\text{ cm}$ -square each aperture has been introduced and was tested at different charge voltage. Under the condition of charge voltage of  $23\text{ kV}$  and pumping energy density of  $10.0\text{ J/cm}^3$ , the average small signal gain coefficient of  $4.99\% \text{ cm}^{-1}$  and energy storage efficiency of  $3.0\%$  are obtained in experiments.

**Key words** ICF; multi-segment-amplifier; phosphate laser glass; small signal gain coefficient

自从惯性约束核聚变(ICF)提出以来,激光驱动器技术得到了飞速的发展。世界各国成功研制了各种规模和水平的高功率激光装置。目前,以组合阵列式片状放大器为核心的多程放大技术已广泛应用于新一代ICF驱动器中<sup>[1-3]</sup>,该方案可以有效地降低整个装置的造价,提高系统的性能价格比。片状放大器是整个驱动器的核心部分,而且对系统的总体性能有着重要影响,其性能的好坏直接影响装置的输出能量和功率。片状放大器系统是我国新一代巨型激光驱动器最重要的组成部分,为此,以系统总体需求为牵引,我们已深入开展了片状激光放大器的研制,利用  $24\text{ cm}$  方口径的三片长单口径片状放大器(SSA),已经成功开展了激光装置主放大器

的原理性研究,并获得了一系列重要的实验结果<sup>[4-6]</sup>,由于SSA的抽运腔腔传输效率较低,导致整个系统的储能效率偏低,并且其安装性能和维护性能不能满足新一代大型激光装置高集成度、高性能价格比的需求,因此,我们开展了新型  $4 \times 2$  口径的阵列式片状放大器单元研制。通过多口径组合和全模块化设计,使系统具有较高的能量转换效率、良好的安装和维护性能,从而提高了放大器系统以及整个装置的运行稳定性和可靠性,并大大地降低了装置的造价。 $4 \times 2 \times 3$  片状放大器的研究重点是其增益能力、储能效率以及光束波前畸变特性。本文将介绍  $4 \times 2$  阵列式大口径片状放大器上开展的增益和储能特性方面的最新研究进展。

收稿日期: 2002-02-25; 收到修改稿日期: 2002-05-13

基金项目: 国家 863 计划惯性约束聚变领域重点资助课题(863-416-7.1)。

作者简介: 王成程(1974—),男,助理研究员,主要从事高功率固体激光技术研究。E-mail: wangchch\_caep@yahoo.com.cn

## 1 $4 \times 2 \times 3$ 阵列式片状放大器结构

$4 \times 2 \times 3$  片状放大器组件由 3 个独立的  $4 \times 2 \times 1$  模块连接组成, 每个  $4 \times 2 \times 1$  片状放大器模块单元采用 8 个  $29 \text{ cm} \times 29 \text{ cm}$  的方形通光口径, 如图 1 所示。为了提高大功率脉冲氙灯的抽运效率, 采用了矩形的 N31 磷酸盐钼玻璃片作为放大器的增益介质<sup>[7]</sup>, 每个模块放置 8 片钼玻璃片, 并沿通光口径方向按布儒斯特角放置, 每张片抽运体积  $V_{\text{total}} = 32 \text{ cm} \times 59 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} = 7552 \text{ cm}^3$ 。反射器采用了新型双曲渐开线形镀银反射器(边灯箱)和菱形反射器(中间灯箱)。每台  $4 \times 2 \times 1$  片状放大器模块中安装 20 支脉冲氙灯, 呈纵向排列。为了充分利用抽运光能量, 氙灯采用了 6-8-6 方式排布, 即两边灯箱分别安放 6 支氙灯, 中间灯箱放置 8 支氙灯。每两支氙灯串联为一组。氙灯放电弧长为 1400 mm, 灯管外径为  $\phi 37 \text{ mm}$ , 爆炸系数  $f_x = 0.2$ 。片状放大器实验系统采用  $4 \times 2 \times 3$  的阵列式结构, 这样可以有效提高放大器抽运光的利用效率<sup>[8]</sup>。同时,  $4 \times 2 \times 3$  阵列式放大器的各部件连接都采用了密封结构, 有效地保证了片腔内的洁净环境。

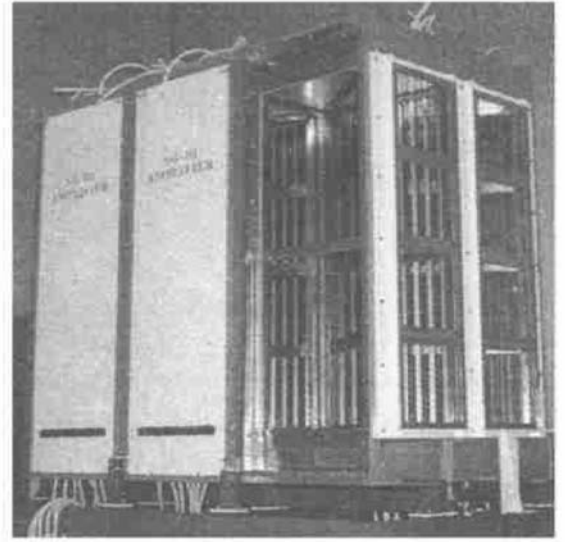


图 1  $4 \times 2 \times 3$  阵列式片状放大器组件结构图

Fig. 1 Schematic configuration of  $4 \times 2 \times 3$  multi-segment amplifier

## 2 实验原理

实验采用了传统的行波法测量放大器的增益, 测量系统光路如图 2 所示。

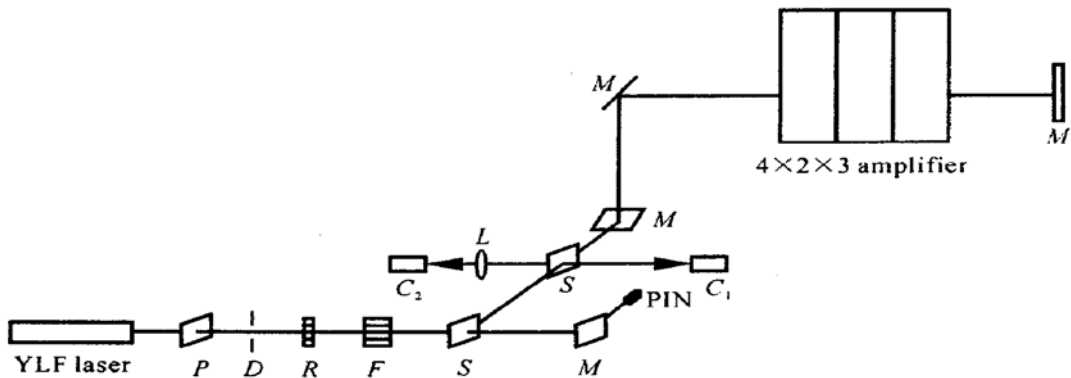


图 2  $4 \times 2 \times 3$  放大器探针光增益测量系统光路图

P: 偏振片; D: 小孔光阑; R: 旋光晶体; F: 法拉第隔离器; M: 反射镜; S: 分光镜; L: 透镜;  $C_1$ : 输入能量卡计;  $C_2$ : 输出能量卡计; PIN: 强流管

Fig. 2 Schematic diagram of small signal gain coefficient measuring system layout

P: polarizer; D: pinhole; R: rotator; F: Faraday isolator; M: mirror;

S: beam splitter; L: lens;  $C_1$ : energy calorimeter of input;  $C_2$ : energy calorimeter of output; PIN: photodiode pipe

实验分四步进行。首先, 利用示波器和强流管对氙灯光和激光信号进行同步调节。因为, 在脉冲氙灯光抽运作用下, 放大器工作物质中反转粒子数数量将随时间改变<sup>[9]</sup>。为了得到最大的增益应使激光信号在反转粒子数达到最大的时刻通过放大器。第二步是对实验过程中使用的激光能量卡计进行定标。第三步是测量动态情况下的氙灯光本底。

最后是放大器小信号增益系数的测量。为了能正确测量小信号增益, 消除能量卡计、分光镜及滤光片等测量元件在定标时引入的系统误差, 采用了相对测量的方法。测试过程中, 用干涉滤光片遮住能量卡计的接收面, 这样做的主要目的是消除杂散光的影响, 提高测量精度。卡计  $C_1$  测量放大器的静态输入光能量, 卡计  $C_2$  测量两次通过放大器光泵后的动态输出光

能量, 则放大器的小信号增益  $g$  可以由下式求出

$$g = (\Delta C_2 / \Delta C_1) / (C_2' / C_1') \quad (1)$$

其中  $\Delta C_2 / \Delta C_1$  为放大器正常工作时的能量比值(扣除氙灯光本底后的比值), 即动态测量值;  $C_2' / C_1'$  为放大器未工作时的静态能量比值, 即卡计定标系数. 小信号增益系数  $\beta$  与小信号增益  $g$  之间的关系为<sup>[4]</sup>

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

式中,  $n$  为钕玻璃的折射率,  $t$ (cm) 为钕玻璃片的总厚度,  $\alpha$  为钕玻璃片的动态损耗系数. 知道了通过放大器前后的光能量比值, 就可以得到小信号增益系数  $\beta$ .

### 3 小信号增益实验研究

利用点探针光源实验测试了  $4 \times 2 \times 3$  放大器系

统的增益能力, 从而为原型装置片状放大器系统的物理及工程方案定型打下基础. 探针光源: Nd:YLF, 1053 nm, 进入放大器能量~ 50 mJ, 脉宽 10~20 ns, 光斑直径尺寸 > 10 mm.

#### 3.1 激光信号和氙灯光脉冲波形的同步调节

首先调节探针光源与抽运脉冲的延时同步问题. 根据多年来的实践经验, 峰值增益通常位于主抽运光脉冲后沿的 1/3 处, 利用我们自行开发的放大器物理模型的计算结果也表明, 片内储能在抽运光脉冲的后沿 1/3 处有一个较宽的“平顶”范围. 因此利用罗氏线圈来监测氙灯放电电流波形、快 PIN 管监测振荡器光脉冲波形、慢 PIN 管监测氙灯抽运光辐射功率波形, 根据三者之间的时序关系, 将探针光源与氙灯抽运脉冲进行了同步, 图 3 列出了充电电压为 23 kV 时的激光信号和氙灯光脉冲波形延时的理论计算和实验测试情况.

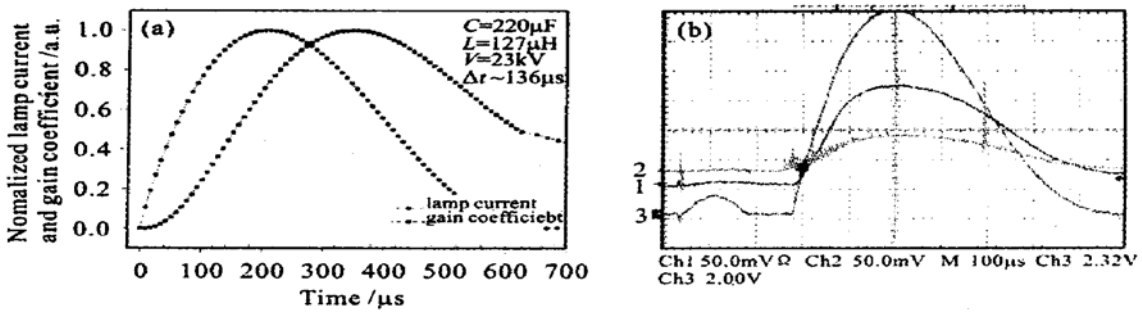


图 3  $4 \times 2 \times 3$  片状放大器小信号增益与抽运脉冲在 23 kV 工作电压下的同步关系

Fig. 3 Relationship between small signal coefficient and pumping pulse under a charge voltage of 23 kV of  $4 \times 2 \times 3$  multi-segment-amplifier

表 1  $4 \times 2 \times 3$  片状放大器小信号增益实验结果

Table 1 Experiment results of  $4 \times 2 \times 3$  multi-segment amplifier

Module	Charge voltage/ kV	Delay / μs	Small signal gain, $g$	Average value of small signal gain coefficient, $\beta_{\text{visible}} / \% \text{ cm}^{-1}$	Average value of small signal gain coefficient, $\beta_{\text{intrinsic}} / \% \text{ cm}^{-1}$
1 <sup>#</sup> + 2 <sup>#</sup> + 3 <sup>#</sup>	10	720	1.082	1.655	2.11
1 <sup>#</sup> + 2 <sup>#</sup> + 3 <sup>#</sup>	15	696	1.140	2.746	3.20
1 <sup>#</sup> + 2 <sup>#</sup> + 3 <sup>#</sup>	18	676	1.183	3.510	3.96
1 <sup>#</sup> + 2 <sup>#</sup> + 3 <sup>#</sup>	20	666	1.208	3.959	4.41
1 <sup>#</sup> + 3 <sup>#</sup> (end slab)	23	628	1.236	4.433	4.88
2 <sup>#</sup> (interior slab)	23	628	1.256	4.768	5.22
1 <sup>#</sup> + 2 <sup>#</sup> + 3 <sup>#</sup>	23	628	1.243	4.551	4.99

#### 3.2 小信号增益系数实验研究

$4 \times 2 \times 3$  放大器的能源系统采用新型的预电离工作方式, 脉冲氙灯的触发由预电离完成, 因此系统

可以从较低的电压开始工作(不存在点灯电压问题), 因此为了更准确地测量放大器小信号增益, 并且能够与理论计算结果相互校核, 从 10 kV 开始测

量,直至 23 kV (10, 15, 18, 20, 22, 23 kV), 这样可以在更宽的范围内来校核理论设计程序, 并且提高实验数据的置信度。

实验中, 由于放大器氙灯对端部模块和内部模块中钽玻璃片的抽运贡献略有差异(1<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> 模块为

端部模块, 2<sup>#</sup> 模块为内部模块), 所以在 23 kV 条件时对端部片和内部片分别进行了测量。实验结果中, 磷酸盐钽玻璃片的动态损耗计为  $0.0045 \text{ cm}^{-1}$ , 测量结果见表 1 和图 4。

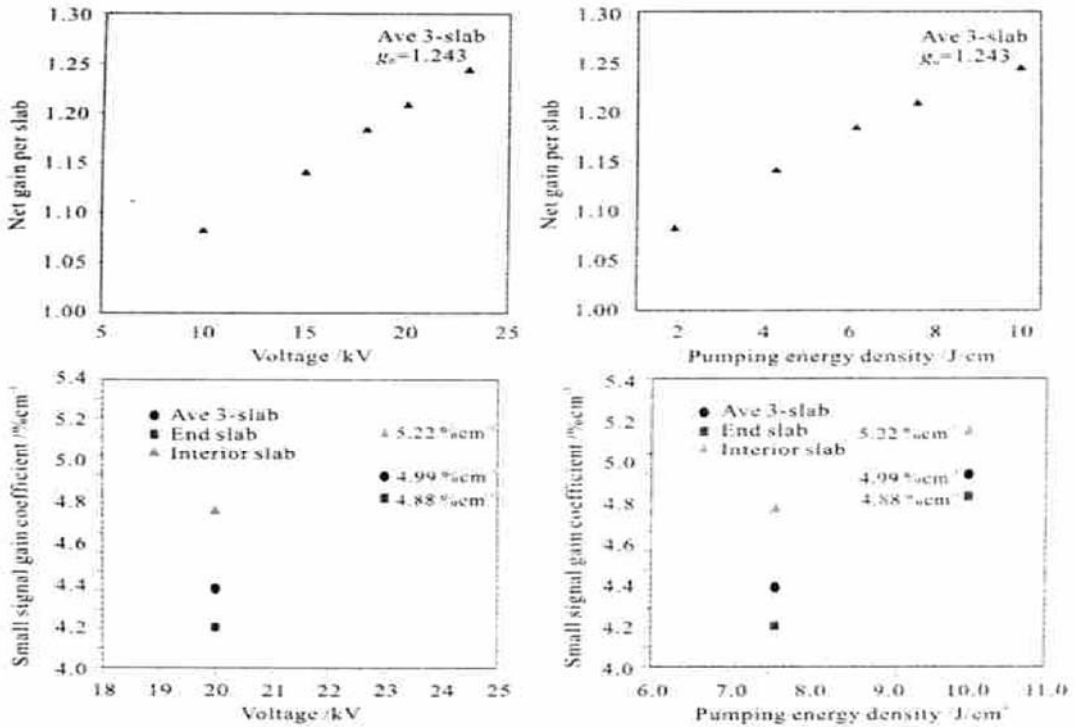


图 4  $4 \times 2 \times 3$  片状放大器小信号增益系数与充电电压、抽运能量密度之间的关系

Fig. 4 Relationship between small signal coefficient and charge voltage and pumping energy density of  $4 \times 2 \times 3$  multi-segment amplifier

## 4 实验结果及讨论

实验过程中, 由于氙灯放电脉宽随着工作电压的升高(10~23 kV)而变窄, 为了保证激光脉冲信号位置始终位于主抽运光脉冲后沿的 1/3 处, 利用自行开发的放大器物理模型对氙灯触发延迟时间进行了精确的调整, 以期获得最高的抽运效率。计算结果也表明, 氙灯触发延迟时间偏离计算值 20  $\mu\text{s}$  以内时对放大器小信号增益值的影响并不大, 这与实验结果相符合。

由表 1 中的实验数据可以很容易得到在 20 kV 和 23 kV 工作电压下, 内部模块、端部模块以及三个模块的平均值, 表 1 中的小信号增益测量值标准偏差为 0.15%。在两个端部模块存在端部漏光的情况下,  $4 \times 2 \times 3$  片状放大器光束口径中心点的增益系数达到了  $4.99\% \text{ cm}^{-1}$  (平均单片净增益 1.243 倍), 而内部片的中心点增益系数为  $5.22\% \text{ cm}^{-1}$  (单

片净增益 1.256 倍)。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[4~6]介绍的 SSA 单口径片状放大器有着很大的区别。在新型抽运腔结构实验条件下, 获得了衡量放大器性能的重要技术参数。实验测试表明, 在充电电压为 23 kV, 抽运能量密度为  $10.0 \text{ J/cm}^3$  时, 小信号增益系数达到  $4.99\% \text{ cm}^{-1}$  和  $3.0\%$  的储能效率, 达到了工程设计的要求, 为我国新一代激光驱动器的建造提供了重要的参考依据。

**致谢** 在实验过程中, 中国工程物理研究院激光聚变研究中心激光技术工程部放大器能源小组、结构设计小组和精密装校小组的同志给予了大力支持, 在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- 1 A. C. Erlandson, M. D. Rotter, D. N. Frank *et al.*.

- Design and Performance of the Beamlet Amplifiers [S]. UCRL- LR-105821-95-1, 1995. 18~ 29
- 2 A. C. Erlandson, H. Lambert, L. E. Zapata *et al.*. The effect of amplifier component maintenance on laser system availability and reliability for the US National Ignition Facility [C]. *SPIE*, 1996, **3047**: 138~ 147
  - 3 A. C. Erlandson, T. Alger, J. Horvath *et al.*. Flashlamp pumped Nd: glass amplifiers for the national ignition facility [J]. *Fusion Technology*, 1998, **34**(11): 1105~ 1111
  - 4 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* (强激光与粒子束), 2000, **12**(2): 155~ 158 (in Chinese)
  - 5 Wang Chengcheng, Zheng Wanguo, Yu Haiwu *et al.*. Research of gain uniformity in large aperture slab amplifier [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(4): 355~ 358 (in Chinese)
  - 6 Wang Chengcheng, Yu Haiwu, He Shaobo *et al.*. Research of gain character in  $2 \times 1$  multislab amplifier [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(9): 769~ 771 (in Chinese)
  - 7 Wang Tao, Fan Dianyuan. Influence of laser medium on performance of the high power laser amplifier [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(4): 289~ 293 (in Chinese)
  - 8 L. E. Zapata, R. McCracken, J. Horvath *et al.*. Large aperture diagnostic system for gain and wavefront measurements on NIF/LMJ amplifiers [C]. *SPIE*, 1996, **3047**: 643~ 648
  - 9 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Jiahua *et al.*. Laser Theory [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996. 12~ 13 (in Chinese)

## LASERS 16 Shanghai' 2003

### 第十六届全国激光学术会议征文通知

中国光学学会激光专业委员会与中国电子学会联合主办的系列会议——第十六届全国激光学术会议,定于2003年10月在上海举行。本次会议将为我国激光与光电子新老学者提供探讨新思想、交流新技术的讲台,促进学术领域的科技创新和科技成果转化。多名两院院士和著名专家到会作特邀报告,同时各分会将安排高水平的邀请报告。欢迎积极投稿,踊跃参加。

上海是全国著名的经济文化中心,拥有众多激光研究、应用、开发的研究所、高校和企业。近年来涌现许多著名的现代景观,如东方明珠电视塔、金茂大厦、APEC会址以及世界首列运营性磁悬浮列车等。热情欢迎激光领域研究与开发的专家学者光临会议。

会议主办单位:中国电子学会,中国光学学会;  
会议承办单位:中国科学院上海光学精密机械研究所;  
会议时间:2003年10月中下旬;会议地点:上海;  
名誉主席:王大珩;主席:范滇元、周寿桓;副主席:朱健强、梅遂生、姚建铨、许祖彦、王益德;秘书长:田守云。

征稿范围:1) 激光物理;2) 超短脉冲激光与非线性光学;3) 全固态激光器与非线性光学;4) 光通讯有源及无源器件;5) 工业激光及其应用;6) 医用

激光及激光与生物组织相互作用;7) 光束传输、控制及光束质量;8) 激光光学材料、薄膜及元器件;9) 其他相关领域。

征文要求:需提交500字摘要和300字提要各一份,分别用于审稿和出版会议指南。摘要应能准确反映研究成果的创新点,包括目的、方法、结果、结论等内容。请用第三人称叙述,不引用参考文献、数学公式和化学式。不接受已在国内外正式出版刊物上发表过的论文。论文截稿期为2003年6月30日。

来稿需注明论文题目、作者姓名、单位、通讯地址(包括邮编、电话、E-mail等)、关键词3~6个。用宋体小四号字按word格式编排,以E-mail附件方式发送,发送至laser2003@siom.ac.cn,务必在左上角标明所属征稿范围的第几类。一般不接受书面邮件,如发送E-mail确有困难者,可书面邮寄至上海800-211信箱《中国激光》编辑部收,邮编201800,请在信封上标明“会议投稿”及所属征文范围第几类,联系电话:021-69918016,网址:www.siom.ac.cn。经审稿录用的论文,将由《中国激光》以增刊形式出版。