

文章编号: 1001-3806(2003)01-0001-03

## 新型高功率固体激光阵列式片状放大器 \*

王成程 於海武 周 海 刘 勇 郑万国

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳, 621900)

**摘要:** 4 × 2 阵列式片状放大器系统是我国正在建造的大型激光驱动器装置的核心组成部分, 将直接确定整个装置的能量转换效率和总体结构。放大器系统采用模块化方案设计可以有效提高装置的可维护性, 减少运行维护时间, 提高运行效率和装置的性能价格比。报道了一台通光口径为 29cm × 29cm 的新型氙灯泵浦钕玻璃激光阵列式片状放大器模块的研制情况, 介绍了放大器系统的结构组成, 并给出了有关设计参数。

**关键词:** 阵列式片状放大器; 氙灯泵浦; 磷酸盐激光玻璃

**中图分类号:** TN248.1<sup>+</sup>2

**文献标识码:** A

## A new high power solid-state laser multi-segment-amplifier

Wang Chengcheng, Yu Haiwu, Zhou Hai, Liu Yong, Zheng Wanguo

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

**Abstract:** The 4 × 2 multi-segment-amplifier system is the hardcore of the high power solid-state laser driver which has been built in China, the energy conversion efficiency and structure of the laser facility have been decided by it. It is availability to adopt the project of module design to improve the maintainability and reduce the maintenance standby time, it also improves the running efficiency and the ratio between performance and price. In this paper, the development progress of a new high power solid-state laser multi-segment-amplifier with 29cm-square each aperture has been reported. The structure and characters of the multi-segment-amplifier are introduced here.

**Key words:** multi-segment-amplifier; flash-lamped pumping; phosphate laser glass

## 引言

在高功率固体激光驱动器 30 多年的发展历程中, 激光驱动器技术得到了飞速的发展。世界许多国家的著名实验室如美国利弗莫尔实验室、法国里梅尔实验室、日本大阪大学激光工程中心等成功研制了各种规模和水平的高功率激光装置。美国利弗莫尔实验室从 70 年代开始建造大型高功率固体激光系统, 在高功率激光装置的研究方面一直处于世界领先地位, 先后建造了 Janus (1974 年), Argus (1976 年), Shiva (1977 年), Novette (1983 年), Nova (1984 年) 等固体激光系统。其中, 片状放大器是整个驱动器的核心部分, 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。为了对放大器的物理问题进行深入的研究, 美

国利弗莫尔实验室先后建造了 SSA, MSA-1, MSA-2 等放大器单元器件, 1994 年为了全面考核、验证用于国家点火装置 (NIF) 的关键技术和元器件, 又建立了 Beamlet 激光装置<sup>[1]</sup>, 该系统采用了以阵列式片状放大器 (MSA) 为主体的多程放大结构, 实验证明, 这种结构可以有效地提高整个系统的能量转换效率和装置的性能价格比<sup>[2,3]</sup>。

片状放大器系统是我国正在建造的新一代激光驱动器中最重要的组成部分, 将直接决定整个装置的能量转换效率、总体结构布局、运行稳定性、可靠性和造价。为此, 以系统总体需求为牵引, 笔者已深入开展了片状激光放大器的研制, 利用 24cm 方口径的 3 片长单口径片状放大器 (SSA), 已经成功开展了新一代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>[4~9]</sup>, 由于 SSA 的泵浦腔腔传输效率较低, 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, 开展了 4 × 2 × 3 新型阵列式片状放大器单元的研制工作。通过多口径组合和全模块化设计, 使系统具有

\* 国家八六三计划惯性约束聚变领域重点资助项目。

作者简介: 王成程, 男, 1974 年 3 月出生。助研。主要从事高功率固体激光放大器技术研究。

收稿日期: 2002-03-15; 收到修改稿日期: 2002-05-08

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,并大幅度降低装置的造价。下面将重点介绍我国自行研制的新型 4 × 2 × 3 阵列式片状放大器系统的结构组成,并且对提高放大器能量转换效率的主要进步点进行分析。

## 1 放大器系统能量转换基本原理

片状放大器物理性能的优劣主要体现在放大器增益能力和储能效率上,即主要反映在放大器的能量转换特性上<sup>[10,11]</sup>。放大器的能量传输过程包括电容器储能到氙灯辐射发光、氙灯光在放大器腔内的传输、钕玻璃片吸收氙灯光、钕离子的泵浦动力学过程和钕玻璃片内的 ASE 作用等主要过程,所以放大器的关键元器件的性能、放大器的结构、放大器各种参数的配置就决定了放大器的能量转换效率(储能效率)和增益均匀性。

要想获得好的放大器物理性能,特别是高的储能效率,就应该从上面几个方面着手,优化放大器能量转换的各个环节,合理设计激光增益介质物理和几何参数、放电回路参数、氙灯参数、泵浦腔形状与参数、努力提高放大器有效能量转换效率。

## 2 4 × 2 × 3 新型阵列式片状放大器系统结构组成

### 2.1 新型泵浦腔结构

放大器泵浦腔结构如图 1 所示,采用了矩形的 N31 磷酸盐钕玻璃片作为放大器的增益介质,每个模块放置 8 片钕玻璃片,并沿通光口径方向按布儒斯特角放置,每张片泵浦体积  $V_{\text{总}} = 32\text{cm} \times 59\text{cm} \times 4\text{cm} = 7552\text{cm}^3$ 。每个 4 × 2 × 3 片状放大器模块中

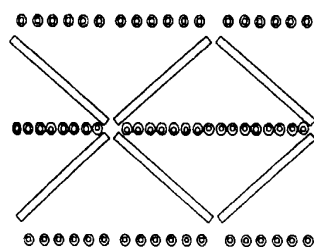


图 2 4 × 2 × 3 放大器泵浦腔中氙灯和磷酸盐激光玻璃片的排布

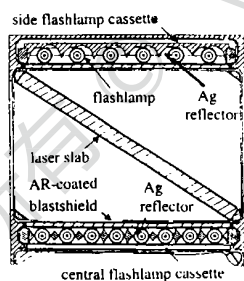


图 1 放大器泵浦腔结构组成

安装 20 支脉冲氙灯,呈纵向排列,如图 2 所示。为了充分利用泵浦光能量,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。氙灯长度为 1640mm,灯管外径为  $\varnothing 7\text{mm}$ 。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)。这种泵浦腔结构能够有效提高脉冲氙灯的泵浦效率和腔传输效率。同时,在脉冲氙灯和钕玻璃片之间安放了石英隔板玻璃,隔板玻璃能够阻挡氙灯放电时产生的冲击波对光束质量的影响、保护造价昂贵的钕玻璃片不被炸碎的氙灯所损伤,同时也保证了片腔的洁净度。

### 2.2 放大器模块组成

4 × 2 × 3 片状放大器组件由 3 个独立的 4 × 2 × 1 模块连接而成,相邻模块之间用装有硅橡胶密封圈的隔断器相连,如图 3 所示。每个 4 × 2 × 1 模块主要由框架构件(FAU)、片箱、中间灯箱、侧灯箱、端镜框和支撑架等部件组成,每个 4 × 2 × 1 片状放大器模块单元采用 8 个 29cm × 29cm 的方形通光口径。由于放大器工作物质钕玻璃片在工作状态时要求极高的洁净度,这就不仅要求钕玻璃片的工作环境(即 FAU 腔内)的洁净度要求很高,而且要求在安装、维护的过程中也要保证片的洁净度,因此,4 × 2 × 3 阵列式放大器的各部件连接都采用了密封结构,有效的保证了片腔内的洁净环境。由于大功率脉冲氙灯在工作过程中将会释放出大量的热能,影响钕玻璃片的工作环境,因此,为了提高放大器系统的发射频率,对放大器的氙灯箱、片腔采用了气体冷却的方法,放大器各单元部件的结构如图 4 所示。



图 3 4 × 2 × 3 放大器模块

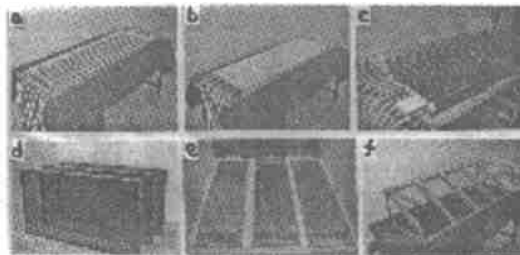


图 4 4 × 2 × 3 放大器主要单元部件

a - 中间灯箱 b - 边灯箱 c - 大功率脉冲氙灯 d - 磷酸盐激光玻璃片 e - 双曲渐开线型反射器 f - 片框

## 3 新型阵列式放大器系统创新点分析

从以上分析表明,新型 4 × 2 × 3 阵列式放大器

在泵浦腔结构设计方面比国内以往的放大器已经有了明显的改进,主要有以下几个方面的进步点。

### 3.1 提高了放大器的能量转换效率

(1) 优化的放大器泵浦腔设计使得激光腔内尺寸较小,这种泵浦腔结构设计提高了激光腔传输效率,提高了泵浦光的利用率。

(2) 新型反射器的采用提高了泵浦光的传输效率。在  $4 \times 2 \times 3$  放大器模块中,边灯箱反射器采用了双曲渐开线形状的镀银反射器,研究表明,这种设计使反射到激光片上的氙灯光更加集中,而被氙灯等离子体吸收的氙灯光更少,是能量利用率最高的一种构型反射器<sup>[12]</sup>。在中间氙灯箱中使用了对称的菱形反射器条,通过它可以把氙灯光直接反射回放大器的钨玻璃片上,从而改善泵浦光分布均匀性,提高了放大器增益的均匀性和泵浦效率。

### 3.2 提高了放大器系统的可维护性和性能价格比

(1) 其模块化的设计、单元器件上装的插入方式使得放大器在组装和维护时更加容易。这种设计最主要的组成部分包括氙灯、激光片和反射器,它们都按可更换的单元安装起来,可以很方便的插入或者移动而不影响周围的组件,从而将维护时间和运行造价降到最低,将性能价格比做到最大。

(2) 在高功率固体激光驱动器的运行过程中,放大器工作一发后由于氙灯辐照而引起的放大器热效应问题会引起整个系统的光束波前畸变,从而严重影响装置的运行周期。采用积极气体冷却的方式可以有效加速热波前的恢复速度,提高放大器的发射频率。

(3) 由于放大器工作物质对工作环境的要求很高,因此,放大器片腔内必须要维持高度洁净的水平,因为当氙灯光和激光加热时,附着在激光片上的小颗粒会引起激光片遭受严重的破坏<sup>[13]</sup>,所以装校激光片用的片框、反射器以及组成片箱的金属部分都要经过高压喷洗等多种工序,并且在一个独立的 100 级洁净间内组装起来。 $4 \times 2 \times 3$  放大器模块中使用了一种耐氙灯光辐照的聚合物来连接隔板玻璃

和金属框架,同时采用一种硅橡胶和锡箔纸封口材料用来密封金属框架和框架结构单元的内部,这些密封措施减弱了氙灯腔和片腔的泄漏率,保证了模块内部的洁净度,提高了放大器中光学元件的使用寿命。

## 4 结束语

在  $4 \times 2 \times 3$  片状放大器模块系统的设计与制造过程中,充分吸收了国内外放大器研究的成果与经验,兼顾到工程与预研的双重需要,使得各单元技术研究、工程实施取得了显著的进展,特别是在系统的设计思想、提高能量转换效率研究和放大器设计方面,相比于国内已有的激光装置,有了长足进步和改善,所有这些工作都将为我国新一代大型激光驱动器的工程建造打下良好的技术基础。

## 参 考 文 献

- [1] Erlandson A C, Rotter M D, Frank D N *et al.* Design and performance of the beamlet amplifiers. UCRL-LR-105821-95-1, 1995: 18 ~ 28.
- [2] Erlandson A C, Lambert H, Zapata L E *et al.* SPIE, 1996, 3047: 138 ~ 147.
- [3] Erlandson A C, Alger T, Horvath J *et al.* Fusion Technology, 1988, 34: 1105 ~ 1111.
- [4] 王成程, 郑万国, 於海武 *et al.* 强激光与粒子束, 2000, 12(2): 155 ~ 158.
- [5] 王成程, 郑万国, 於海武 *et al.* 中国激光, 2001, 28(4): 355 ~ 358.
- [6] 王成程, 於海武, 贺少勃 *et al.* 中国激光, 2001, 28(9): 769 ~ 771.
- [7] 於海武, 郑万国, 贺少勃 *et al.* 强激光与粒子束, 2000, 12(4): 411 ~ 415.
- [8] 於海武, 郑万国, 贺少勃 *et al.* 强激光与粒子束, 2000(增刊): 145 ~ 148.
- [9] 於海武, 郑万国, 王成程 *et al.* 中国激光, 2001, 28(11): 961 ~ 965.
- [10] 克希奈尔 W. 固体激光工程. 北京: 科学出版社, 1983: 628 ~ 642.
- [11] Verdeyen J T. Laser electronics. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1981: 154 ~ 155.
- [12] 谭吉春, 郑万国, 张红兵 *et al.* 强激光与粒子束, 2001, 13(2): 147 ~ 150.
- [13] Stowers I F, Horvath J A, Menapace J A *et al.* SPIE, 1998, 3492: 609 ~ 620.