

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0276-04

高功率激光放大器中的能量传输

贺少勃, 陈远斌, 於海武, 杨 东, 郭良福, 力一峰, 刘 勇, 刘建国

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 片状放大器系统是高功率激光装置中最重要的能量和功率来源。主要分析高功率激光驱动器中片状放大器的能量传输和转换问题。放大器中能量转换主要通过储能模块、脉冲氙灯、抽运腔和增益介质等单元实现。通过理论模拟和实验的方法, 结合原型装置(TIL)片状放大器, 详细研究了不同能量转换环节的效率对放大器整体性能的影响。研究表明, 目前原型装置所使用的激光片状放大器通过初步的优化设计, 已经达到了 $5\%/cm$ 的小信号增益系数, 满足了装置要求。但由于受到关键单元器件加工技术的限制, 并没有达到最优化的设计指标。高效率放大器不仅是考虑放大器设计和运行成本的需要, 更是保证放大器系统稳定高效运行的需要。

关键词 激光技术; 片状放大器; 小信号增益系数; 能量传输; 氙灯

中图分类号 TN012 **文献标识码** A

Energy Transmission in High Power Laser Amplifier

HE Shao-bo, CHEN Yuan-bin, YU Hai-wu, YANG Dong, GUO Liang-fu,

LI Yi-zheng, LIU Yong, LIU Jian-guo

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

Abstract To high power laser driver, the disk amplifiers are the most important sources of energy and power. The energy transmission and conversion in high power laser disk amplifier are discussed. The energy transmission is achieved by the energy bank modules, pulse flash-lamp, pump cavity and gain medium. The effects of different energy transmission process on the whole performance of disk amplifiers are researched by simulation and experiments. Results show that the small signal gain coefficient of $5.0\%cm^{-1}$ and energy storage efficiency of about 3.0% are achieved by primary optimization in technical integration line (TIL). But because of the quality of some key elements, the best results are not obtained. High efficiency does not only improves the disk amplifier performance, reduce the cost, but also improves the amplifier reliability and stability.

Key words laser technique; high power laser; disk amplifier; small signal gain coefficient; energy transmission; flash-lamp

1 引 言

片状放大器涉及的物理问题主要包括能量转换和光束控制两大基本问题。激光放大器系统主要解决驱动器的纵向能量传输, 即以放大器储能效率和降低放大器热效应为研究目标, 完成由电容器到钽玻璃片上能级的能量传输和转换^[1]。

放大器中能量转换主要通过储能组件、脉冲氙灯、抽运腔和增益介质等单元部件实现。为了达到最佳的性能和最高的效率, 必须使放大器每一个单元部件设计尽量最优, 并保持较高的可靠性。如能源模块须考虑能库总的功率、工作电压、电容、电感、开关等参量。经过电缆传输后, 电能有 80% 左右传

送到脉冲氙灯, 此时须确定脉冲氙灯的排布方式、数量、尺寸、充气气压、冷却方式等, 以期达到最高的电光转换效率。氙灯的抽运光通过抽运腔辐射到增益介质上, 为使介质上接受尽可能多的辐射, 并使辐射尽量均匀, 必须优化抽运腔的腔型结构; 同样, 对增益介质而言, 尺寸、排布方式、介质特性也有非常重要的作用。放大器的设计和优化, 关联到众多元器件的协同配合。在各单元的设计中必须考虑到对系统的影响和指标分配。放大器的设计必须是在总体设计的框架下, 以提高系统的储能效率、增益能力、降低热效应为目标, 结合元器件的可靠性水平, 进行系统设计。合理均衡的能量转换和传输效率, 是决定放大器稳定可靠、高效运行的前提和保障。

基金项目: 国家 863 计划惯性约束聚变领域重点资助课题。

作者简介: 贺少勃(1974—), 男, 陕西商南人, 中国工程物理研究院激光聚变研究中心助理研究员, 硕士, 主要从事高功率固体激光技术的研究。E-mail: heshaoocn@yahoo.com.cn

2 能源系统

2.1 储能电容

放大器使用过程中,由于运行环境等问题,电容会发生一定程度的下降和失效。表1给出了原型装置在电容下降一定百分比情况下小信号增益系数和总体输出能力降低的模拟结果。

表1 储能电容对原型装置增益能力的相对影响

Table 1 Relation between gain ability and bank capacity

Bank capacity / μF	Simulative small signal gain coefficient /(%/cm)	Relative gain /%
242.00 (100%)	5.099	100.00
237.16 (98%)	5.066	97.29
229.90 (95%)	5.014	92.90

表2 放大器特性随电感的变化

Table 2 Change of the amplifier properties with the inductance

Inductance / μH	Pulse width / μs	Dump coefficient	Explode coefficient /%	Small signal gain coefficient/(%/cm)
50	330	0.944	30.6	5.33
70	390	0.868	28.3	5.36
100	467	0.794	26.0	5.32
120	511	0.758	24.9	5.27

3 抽运源

大型激光片状放大器的抽运源主要采用大尺寸脉冲氙灯,和小型的氙灯相比,其充气气压较低,管壁较厚。所承受的能量和功率远大于小型氙灯,虽然与后者有相似之处,但大尺寸氙灯的设计方法和小型氙灯还是有明显区别,二者的评价标准也不尽相同,需要结合元器件的水平进行全局优化,提出适用于装置发展水平对抽运源的要求。

3.1 氙灯尺寸和排布方式

氙灯尺寸和排布方式主要取决于增益介质的尺寸和排布方式。但在管壁厚度、直径方面还有一定的优化空间。这方面的优化必须和氙灯的总体排布、承受负载和光谱光效特性结合起来^[3]。以原型装置为例,分别计算了内径从2.8~3.6 cm时氙灯光谱特性、爆炸系数和它对小信号增益系数的相对影响,见表3。在抽运条件(电容、电感、放电电压)不变的情况下,随着氙灯内径的增大,相对小信号增益系数增加,而氙灯的负载明显下降。图1给出了在23 kV工作电压下,氙灯内径分别为2.8 cm和3.6 cm时辐射光谱的变化情况,从图1可以看出,在紫外部分,内径越大的氙灯相对辐射越低,而在可

其中假设腔内和助推放大器都工作在23 kV。根据文献[2]的计算方法,可以清楚计算电容储能的下降对放大器小信号增益系数的影响。

2.2 放电电感

考虑到增益介质有限的荧光寿命,一般设计的放电脉宽尽量靠近荧光寿命,同时保证放电系统处于临界阻尼状态,可以保证高的转换效率。原型装置钎玻璃的荧光寿命为320 μs ,最初的电感 L 设计值为75 μH ,电容 C 为242 μF ,对应放电脉宽为400 μs 。但考虑到脉冲氙灯的抗冲击能力,电感从75 μH 变为120 μH ,放电脉宽变为520 μs (对应 $3\sqrt{LC}$)。表2给出了原型装置电感从50 μH 变到120 μH 时放电脉宽、阻尼系数、爆炸系数和小信号增益系数的模拟计算结果。

表3 氙灯内径变化对片状放大器增益和负载的影响

Table 3 Relation between gain coefficient, explode coefficient and diameter of flash-lamp

Inter diameter /cm	Relative gain coefficient /%	Explode coefficient /%
2.8	97.8764	28.5
3.0	100.0000	26.6
3.2	101.7375	24.9
3.4	103.2819	23.3
3.6	104.6332	21.9

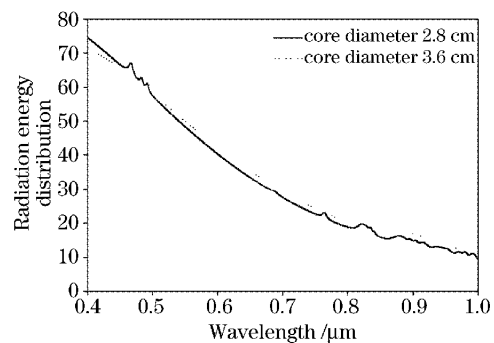


图1 不同内径氙灯的光谱辐射能量分布

Fig. 1 Radiation energy distribution in different lamp diameters

见光部分,内径越大对应的氙灯光谱也越高,也就意味着放大器设计时尽量采用大口径的氙灯,或者说在空间和可靠性允许的情况下,应尽可能扩大口径并减小管壁厚度。

3.2 氙灯充气气压

充气气压是氙灯的一个重要指标,它确定了氙灯的阻抗和辐射特性。H. T. Powell 等^[4]对氙灯进行了详细研究之后得到一个经验模型,即氙灯的进灯电功率密度(kW/cm^2)由氙灯的电流密度 j (kA/cm^2),氙灯内径 d (cm),氙灯充气气压 p (Pa)决定

$$P_{\text{in}} = 2.81 \exp[1.48 \ln(j) + 0.90 \ln(d) + 0.20 \ln(p) + 0.050 \ln(j) \ln(d)], \quad (1)$$

小型氙灯充气比较高,大型氙灯气压低,目的是提高氙灯线状谱的成分。氙灯的充气气压在不同的放电参量和氙灯尺寸下有一个最优值。根据原型装置放大器的小信号增益系数随氙灯气压变化的模拟结果,氙灯充气气压在 $(0.16 \sim 2.00) \times 10^5$ Pa,小信号增益系数最高,如图 2 所示。

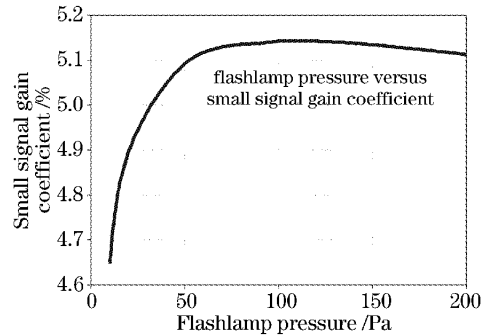


图 2 氙灯充气气压对增益系数影响的模拟结果

Fig. 2 Simulation results of small signal gain coefficient versus flash-lamp pressure

4 抽运腔

抽运腔的设计主要是保证足够的抽运效率和足够的抽运均匀性。主要的影响因素是抽运腔反射器的构型和效率。表 4 给出了实验装置在不同时刻、相同注入能量下增益倍数的变化情况。

表 4 原型放大器的放大能量随时间的变化

Table 4 Energy gain of amplifier versus time changes

Time	Voltage /kV	Input energy /J	Output energy /J	Total gain	Simulate results
2004081001	MA:23	4.08	2366	580	570
2004111101	BA:20	4.10	1689	412	569

从表 4 可看出,在相同注入能量和配电参量的情况下,不同时间的系统增益能力明显要低,放大倍数相差一百多倍。经过分析发现是反射器的反射率下降造成的,在重新擦拭反射器后增益明显恢复。从实验结果上看,对原型装置增益系数的影响可达 10%。

5 增益介质

5.1 荧光寿命

为了直观地描述增益介质的荧光寿命对放大器增益特性的影响情况,模拟了 N31 和 LG-770 激光

玻璃。改变荧光寿命和掺杂浓度的差别,利用 AMP2000 程序和 SG99 程序对原型装置的输出能力进行比较。假设预放的注入能量仍为 7.07 J。腔内和助推放大器分别工作在 23 kV 和 22 kV。表 5 给出了模拟计算的结果。从表 5 可以看出,如果能够使 N31 玻璃在掺杂质量分数为 4.0% 时的荧光寿命保持在 340 μs ,就可以使原型装置的输出能量增加 1500 J,放大倍数增加 70 倍。如果掺杂质量分数为 4.0% 时的荧光寿命能够有 320 μs ,输出能量也可以增加 260 J,增加 7.9%。

表 5 荧光寿命对原型装置放大器输出的影响

Table 5 Effect of fluorescence lifetime on the amplifier energy output

Type	Nd ³⁺ concentration / ($\times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$)	Fluorescence lifetime / μs	Simulate results by AMP2000 / (%/cm)	Simulate output energy by SG99 / J	Total gain
N31	4.0	300	4.858	3296	466
LG-770	4.0	340	5.016	3797	537
N41	4.0	320	4.940	3557	503

5.2 掺杂浓度

增益介质的掺杂浓度存在优化取值,当掺杂浓

度过低时,介质不能充分吸收抽运能,翻转粒子数会减少,造成大量的抽运能量浪费。反之,如果掺杂浓

度过高,一方面会产生浓度猝灭效应,另一方面,大量的抽运能会沉积在增益介质表面。过多的抽运同样不会有作用,相反会产生严重的表面自发辐射放大效应。表6为AMP2000模拟的不同掺杂浓度的小信号增益系数相对变化。

表6 掺杂浓度对小信号增益系数的影响

Table 6 Effect of doping concentration on the relative small signal gain coefficient

Nd ³⁺ concentration /($\times 10^{20}$ cm ⁻³)	Relative small signal gain coefficient /%
2.2	90
3.0	98
4.0	100
5.0	111

6 结 论

利用 $4 \times 2 \times 3$ 放大器、原型装置的实验结果和模拟程序对二者的能量转换和传输环节进行了比较细致的对比。利用AMP2000程序和SG-99程序对原型装置放大器的能流分布过程进行了理论模拟,并对实验数据进行了校核。通过和国际同类装置的

放大器能流和增益特性的实验和模拟结果比较,确定了主机放大器优化设计的方向。由分析可以看到,在片状放大器的设计中,为了能得到相同的输出能量,就必须增加更多的抽运。但仅仅增加抽运,又会使元器件的负载增加,严重降低系统的可靠性。所以高效率放大器不仅是考虑放大器设计和运行成本的需要,更是保证高功率激光装置稳定可靠运行的需要。

参 考 文 献

- 1 He Shaobo, Zheng Wanguo, Yu Haiwu *et al.*. Research of single segment laser amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(9): 769~774
贺少勃,郑万国,於海武等. 单通激光片状放大器的模拟计算分析 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(9): 769~774
- 2 Yu Haiwu, Zheng Wanguo, He Shaobo *et al.*. Physical performance optimization for high power Nd³⁺ glass solid state laser amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(suppl.): 81~85
於海武,郑万国,贺少勃等. 高功率钕玻璃固体激光放大器物理性能优化设计 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(增刊): 81~85
- 3 J. P. Markiewicz, J. L. Emmett. Design of flashlamp driving circuits [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1966, **2**(11): 707~711
- 4 Howard T. Powell, Alvin C. Erlandson, Kenneth S. Jancaitis *et al.*. Flashlamp pumping of Nd³⁺ glass disk amplifiers [C]. *SPIE*, 1990, **1277**: 103~120