

# “神光-Ⅱ”主放大器的研制\*

郑玉霞 朱 俭 钱列加 张明科 范滇元

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

**提要** 报道了一种新型组合式(2×2 列阵)同轴双程放大器——“神光-Ⅰ”实验装置的主放大器, 净通光口径为  $\phi 200$  mm, 以及在单束原型机上取得的判断实验和理论计算的结果。

**关键词** 同轴双程放大器, 组合式

## 1 引 言

“神光-Ⅰ”高功率钕玻璃激光器, 是我国新一代的惯性约束聚变激光驱动器。作为驱动器最昂贵单元及提供 80% 以上总能量的主放大器, 采用新型组合式同轴双程放大的技术路线。设计了独特的“同轴型”注入和引出光路, 避开了大口径电光开关的技术难点。它在很大程度上不同于传统的多路 MOPA 方案。无大口径开关的同轴双程放大器, 国际上现有的驱动器装置中尚无采用的先例, 技术难度是很大的。虽然组合式侧向泵浦的泵浦效率会大幅度提高, 但可注入总泵浦能量受到一定的限制, 如何达到增益系数的设计指标成为一个突出的问题。而我们采用组合式放大结构, 要求进一步提高氙灯的破坏负载, 降低其破坏造成的危害, 则成为另一个突出的问题。

为确定主放大器的最终定型, 我们作了大量的研制准备和新技术开发工作, 并取得了许多重要的进展, 特别是完成了主放单束原型机的判断实验工作, 由此最终确定了主放大器的主要技术参数及设计指标。

## 2 实验装置

我们所采用的组合式结构的主放大器如图 1 所示。氙灯和钕玻璃片交叉放置, 钕玻璃片以 2×2 形式列阵, 每束有 6 片钕玻璃为工作物质, 按布氏角安放, 中间排布 88 支, 外侧排布 72 支内径  $\phi 16 \times 500$  mm 的脉冲氙灯, 允许四束  $\phi 200$  mm 口径的光束并行通过。用组合式结构来提高泵浦效率, 用双程放大方式有效地提高能量抽取效率。实验是在单束原型机上进行的, 其实验光路如图 2 所示。利用空间滤波器来实现光束的注入和引出。前级放大器的激光束经中心开孔的 45°全反射镜  $M$ , 以发散光方式进入片状放大器, 经凹面全反射镜  $f_2$  反射, 以平行光方式第二次通过片状激光器, 再经透镜  $f_1$  会聚后穿过滤波小孔, 由透镜  $f_3$  出射到靶室, 滤波

\* 参加本工作人员还有: 刘凤翹, 唐贤忠, 柴志豪, 张 臻, 马维新, 印惠英, 吕君孝。

器总长 23.3 m。

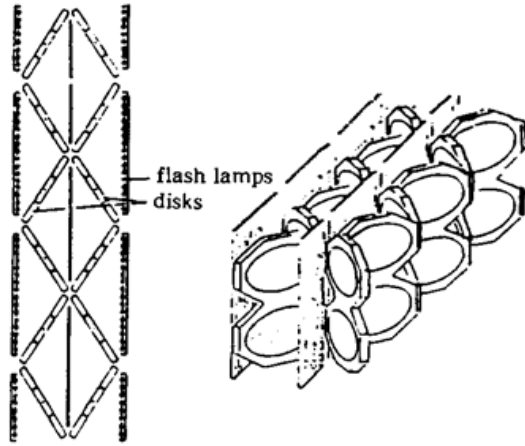


Fig. 1 Schematic of the amplifier in 2×2 array

在光学系统的设计中,主要遵循了如下要点: (1) 尽可能高的填充因子,以充分利用增益介质; (2) 避免主放的自激振荡,所设计的光学系统为  $M \cong 2$  的非稳腔; (3) 多功能输入透镜  $f_0$  具有调焦和补偿像散的双重作用。原型机采用超净装校工艺,空间滤波器的真空度较“神光-1”实验装置提高一个数量级。

为了保证装置运行的安全性,我们采取了若干有力措施,包括用普通石英管替代掺铈石英管以改善氙灯壁厚的均匀性,大幅度提高氙灯的爆炸能量,应用了假灯(Dummy)和 Osaka 触发线技术等,在很大程度上减缓氙灯间洛仑兹力的作用和有效地降低氙灯的破坏危害。

为了保证装置运行的安全性,我们采取了若干有力措施,包括用普通石英管替代掺铈石英管以改善氙灯壁厚的均匀性,大幅度提高氙灯的爆炸能量,应用了假灯(Dummy)和 Osaka 触发线技术等,在很大程度上减缓氙灯间洛仑兹力的作用和有效地降低氙灯的破坏危害。

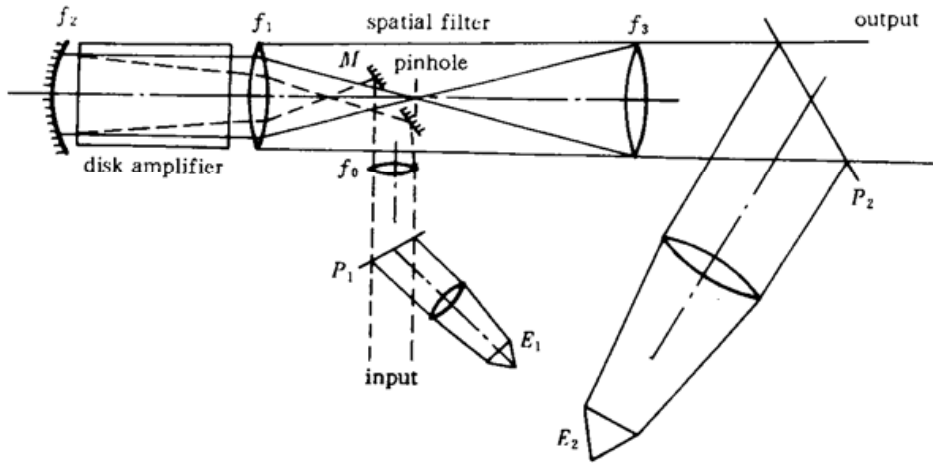


Fig. 2 Optical path of two-pass main amplifier

### 3 增益性能的测量

#### 3.1 小信号增益的测量

我们采用了两种方法: (1) 阈值法; (2) 探针法。

##### 3.1.1 阈值法测量的结果示于表 1。

Table 1 Small signal gain (threshold method)

Voltage (kV)	Total pumping energy (kJ)	Capacitance/four lamps ( $\mu\text{F}$ )	Gain coefficient ( $\text{cm}^{-1}$ )
20.0	292.30	100.8 (6.3 $\mu\text{F}$ × 16)	0.029
21.7	344.13	100.8 (6.3 $\mu\text{F}$ × 16)	0.040

Table 2 Small signal gain (the probe method)

Voltage (kV)	Total pumping energy (kJ)	Capacitance/four lamps ( $\mu\text{F}$ )	Gain coefficient* ( $\text{cm}^{-1}$ )
20.5	307.12	100.8 (6.3 $\mu\text{F}$ × 16)	0.039
22.0	353.70	100.8 (6.3 $\mu\text{F}$ × 16)	0.042

### 3.1.2 探针法测量结果示于表 2。

表 2 中 \* 含有损耗系数  $\alpha$  在内, 即  $\beta^* = \beta_0 - \alpha$ , 而  $\beta_0 = \Delta N \cdot \sigma$ , 设计中的增益系数  $\beta_0 = \beta^* + \alpha$ 。

由此两种方法所得的增益系数值基本上一致, 说明测量结果是可靠的, 实验中采用的探针法不能直接得到增益系数, 而是根据测得的小信号增益  $G$ , 用小信号增益公式  $e^{\beta L} = G$ , 而反推出增益系数  $\beta = \ln G/L$ , 所得结果比较可靠。阈值法测量增益系数是根据谐振腔起振条件  $R_1 R_2 e^{2\beta L} = 1$ , 小信号的增益系数可表示为

$$\beta = \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 \cdot R_2}\right)$$

其中  $L$  为工作物质的有效长度,  $R_1, R_2$  分别为介质膜的反射率。此法测量所得结果, 一般偏于保守, 不会导致过高的估计。

## 3.2 双程放大增益的测量

3.2.1 每组灯的电容量为  $100.8 \mu\text{F}$  ( $6.3 \mu\text{F} \times 16$ ) 的测量结果和计算值示于表 3。

Table 3 Two-pass amplifier gain (capacitance/four lamps is  $100.8 \mu\text{F}$ )

Number	Pumping energy density ( $\text{J}/\text{cm}^3$ )	Input laser energy (J)	Gain efficient ( $\text{cm}^{-1}$ )	Calculated gain (time)	Experimental gain (time)
1	17.95	70.00	0.0322	4.20	4.16
2	17.95	76.30	0.0322	4.11	4.14
3	22.17	16.80	0.0373	6.23	6.30
4	22.17	26.04	0.0373	6.00	6.03
5	22.17	71.05	0.0373	5.20	5.35

3.2.2 每组灯的电容量为  $88.2 \mu\text{F}$  ( $6.3 \mu\text{F} \times 14$ ) 时增益系数。

为了缩短电流脉冲宽度, 提高反转粒子数的抽运效率, 每组灯去掉两个电容, 即每组灯的电容量为  $88.2 \mu\text{F}$  ( $6.3 \mu\text{F} \times 14$ ), 14 个电容时得的实验值和理论计算值如表 4。

Table 4 Two-pass amplifier gain (capacitance/four lamps is  $88.2 \mu\text{F}$ )

Number	Pumping energy density ( $\text{J}/\text{cm}^3$ )	Input laser energy (J)	Gain efficient ( $\text{cm}^{-1}$ )	Calculated gain (time)	Experimental gain (time)
1	17.95	60.06	0.0304	3.92	3.90
2	17.95	62.12	0.0304	3.87	3.88
3	22.17	57.96	0.0350	4.89	4.90
4	22.17	69.51	0.0350	4.54	4.50
5	25.62	65.82	0.0374	5.41	5.37
6	25.62	68.46	0.0374	5.36	5.40

图 3 是把两种不同电容量得到的小信号增益系数进行比较, 从中我们发现, 减少电容量并没有明显提高泵浦效率, 反而在泵浦能密度较大时有所下降。14 个电容器在低泵浦能密度下, 泵浦效率高于 16 个电容器的情况, 但随着输入泵浦能量的增加, 效率反而低于后者, 这只能解释为当输入泵浦能量较低时, 光谱紫外部分的能量相对较弱, 由减少电容量使泵浦时间缩短导

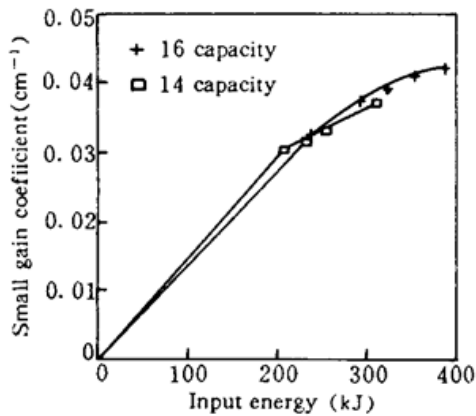


Fig. 3 The small signal gain coefficient under different pump capacity

致的抽运效率的提高占主要地位,所以,电容量小时的泵浦效率高,小信号的增益系数大;随着输入泵浦能量的增大,氙灯辐射光谱的紫移效应占主导地位,在相同的输入泵浦能量下,14个电容的泵浦时间短,氙灯辐射光谱紫移更加明显,所以泵浦效率反而下降。

综上所述,作为比较的结论,当每组灯的电容量从  $88.2 \mu\text{F}$  增加到  $100.8 \mu\text{F}$  时,高能泵浦效率没有降低,说明氙灯辐射光谱的紫移量没有明显的改变,故在氙灯峰值电流基本不变的情况下,

靠增加适当的电容量来增加注入泵浦能量,从而提高增益系数的方法是切实可行的。

### 3.3 增益的横向均匀性

在目前氙灯配置的情况下,有聚光器一侧的增益比没有聚光器的内侧高 10% 左右,故在主放最终定型中,应减少有聚光器一侧氙灯的数目。放大器靠近边缘部分的增益比中心部位的增益高 4% 左右。

### 3.4 ASE 的测量

在高能泵浦时测得的 ASE 约为 0.2 mJ。

### 3.5 主放自激振荡的判断

经多种方法判断,主放即使在高能泵浦时,也不存在自激振荡。

### 3.6 光束质量

经阵列相机测量,主放输出光束的质量约为 10 倍衍射极限,像散不明显。

### 3.7 主放光学系统的稳定性的判断实验

作为光束指向性判断实验的结论是:如果以靶面空间固定位置作调焦基准,我们已经成功地控制角漂均方差为  $3''$ 。不论是以空间固定位置,还是以上一次发射的激光位置作为基准,我们都能有效地控制角漂。

### 3.8 寄生振荡的判断实验

在主放的增益测量实验中发现,增益曲线在  $\beta \times D \approx 1.3$  时出现增益饱和现象,如图 4 所示。有效辐射带内的光子数上升的斜率基本不变,而实验获得的增益系数值上升速度越来越慢,即泵浦效率越来越低。综合分析实验中的各环节,促使泵浦效率降低最可能因素是包边不良引起的寄生振荡,包括体振荡和表面振荡,因而明显影响了高能泵浦时增益系数的提高。为此,我们做了判断实验。

在单束原型机上,我们做了两个实验。一个是在该台放大器上,我们测出了输入光泵密度与增益系数的曲线如图 4 所示。第二个实验是把  $208 \times 398 \times 40$  (mm) 的钽玻璃片的两个通光面,用银皮挡成通光口径为  $\phi 100$  (mm) 的片状放大器,其余部分的氙灯辐射都被银皮挡掉,其增益曲线如图 5 所示。

由两图可以看出,在用银皮挡去介质边缘部分,通光口径减小为  $\phi 100$  (mm) 时,在同样泵浦条件下,增益系数有明显的提高,增益系数随泵浦能量的增加趋势逐渐靠近泵浦光趋势,这十分明显说明在第一个实验里,钽玻璃片内确实有寄生振荡发生,无疑包边不良是主要原因。

按设计要求,钽玻璃片侧面包边后的剩余反射率  $R \leq 1\%$ ,按此要求,在包边材料的吸收

系数为  $50 \text{ cm}^{-1}$ ，其折射率为  $1.71 \sim 1.72$  时，包边材料的厚度应在  $300 \mu\text{m}$  以上。可实际测量结果表明，最近的钕玻璃片的硬包边材料的厚度多数都低于  $100 \mu\text{m}$ ，此时对应片侧面的剩余反射率高达  $15\%$  以上。在这种包边不良的情况下是极易产生寄生振荡的。

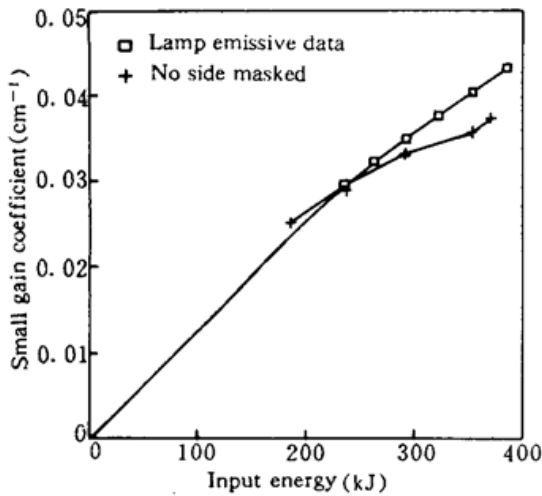


Fig. 4 The comparison of small signal-gain coefficient of experimental results under three different conditions; Nd : glass slab is not side masked

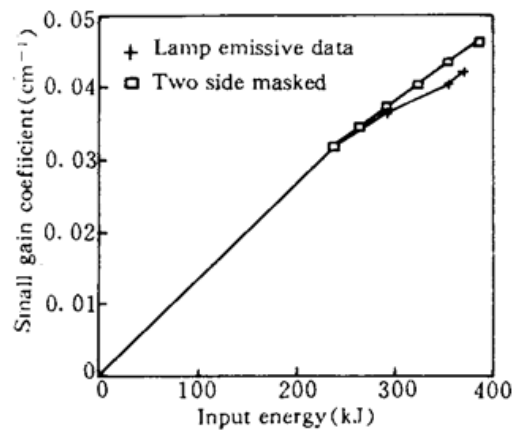


Fig. 5 The comparison of small signal-gain coefficient of experimental results under three different conditions; Nd : glass slab is two sides masked

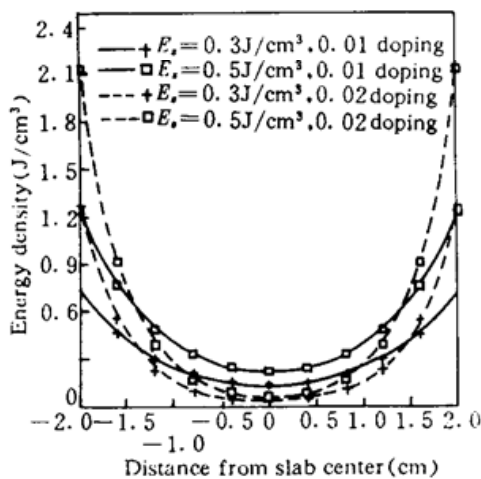


Fig. 6 Absolute energy density vs slab thickness under the different doping and average stored energies.  $E_s$  is the average stored energy density

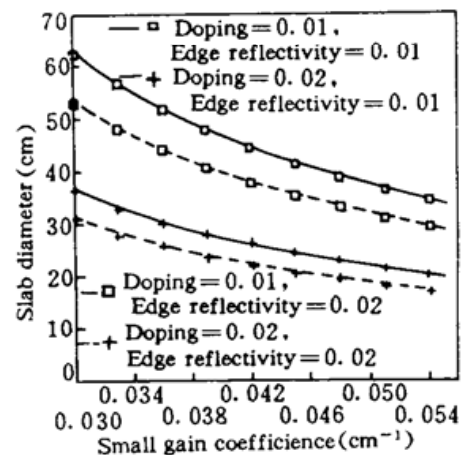


Fig. 7 Maximum diameter of slab vs  $E_s$  under the different doping and edge reflectivities.  $E_s$  is the average stored energy density

理论计算也表明，在我们目前光泵条件下，钕玻璃片内的储能密度分布是很不均匀的，如图 6 所示。表面处的能密度高于中心位置数倍，且随掺杂浓度的增加而进一步增大，所以介质中增益系数的分布同样是很不均匀的。表面处的增益系数比平均增益系数大数倍，若包边不好，寄生振荡在增益最大的表面处首先发生。如果片包边后的剩余反射率分别为  $1\%$  和  $2\%$ ，掺杂浓度分别为  $1 \text{ wt.}\%$  和  $2 \text{ wt.}\%$  时，钕玻璃片允许的最大口径与平均能密度间的关系示于图 7。从这些结果可以看到，主放中的钕玻璃片长轴长度为  $40 \text{ mm}$ ，当小信号增益系数为  $0.05 \text{ cm}^{-1}$  时，已完全处在寄生振荡的阈值，所以，我们在实验中发现，随着泵浦能量的增加，增益系数并非等比例地上升，而泵浦能量越高，上升速度越慢，其主要原因就是发生了寄生振荡。从计算的结果中还可以看到，减少掺杂浓度，良好的包边可以有效地抑制寄生振荡，其中减少掺杂浓度对寄生振荡的抑制影响最大，当然这是以减小泵浦能量的吸收率为代价的。目前我

们使用的工作物质浓度为 2.2 wt.-%,可适当地降低,对寄生振荡的抑制有好处。

## 4 实验结果讨论

单束原型机判断实验表明主要存在的问题有:

- 4.1 增益系数偏低。解决这个问题,首先要作好钽玻璃片侧表面的包边工作,使得在高能泵浦时钽玻璃片内没有寄生振荡发生,提高增益系数。增加输入泵浦能量。氙灯尺寸将从原来的内径  $\phi 16$  mm 增加到  $\phi 18$  mm,提高氙灯的负载能量。在保持峰值电流密度不变的情况下,适当地增加电容量及钽玻璃片的数目,确保增益系数不低于  $0.047 \text{ cm}^{-1}$ 。
- 4.2 总体静态透过率较低,损耗近 50%,通过各种改进措施,使系统的损耗不大于 30%。
- 4.3 由图 5 可以看出,随着泵浦能量的提高,氙灯辐射有效辐射带内的光子数上升的斜率基本不变,而实验获得的增益系数上升的斜率低于上述曲线的原因有待进一步研究。

主放课题的研究工作,是在“神光-Ⅰ”项目负责人邓锡铭院士、王世绩研究员及范滇元院士的直接领导下完成的,并自始至终得到范滇元院士的具体指导。

## 参 考 文 献

- 1 J. L. Mmctt, W. F. Krupke, J. B. Trenholmc. Future development of high power solid state laser-system. *Sov. J. Quant. Electr.*, 1983, 13: 1~23
- 2 J. H. Kelly, M. J. Shoup II, M. D. Skeldon *et al.*. Design and energy characteristics of a multisegment glass disk amplifier. Laboratory for lader energetics, University of Rochester. *SPIE Solid State Lasers I*, 1991, 1410: 40~46
- 3 J. R. Murray, J. B. Trenholme, J. T. Hunt *et al.*. Upgrad of the LLNL Nova laser for inertial confignment fusion. *SPIE Solid State Laser I*, 1991, 1410: 28~39
- 4 Alexandov V. V. *et al.*. The performance of the high-power Nd: glass amplifier for ICF. 20 ECLIM, 1990, January 22~26, Schliersce, FRG.
- 5 A. Bettinger, L. Jacob, C. Meunier *et al.*. Uniform energy dinsity at the output of high power glass lasers. Digest of technical papers, 1973 Conference on Laser Engineering and Applications (CLEA), Washington, D. C., 93~94(IEEE, New York, NY, 1973, June)
- 6 H. T. Power, A. C. Erlandson, K. S. Jancaitis *et al.*. Flashlamp pumping of Nd: glass disk amplifiers. *SPIE Proceedings*, 1990, 1277: 103; Performance of a Multisegment Nd: glass Amplifier; Technical digest, Conference on Lasers and Electro-optics CLEO-90, Optical Society of America, Washington, D. C., JWBS, 1990
- 7 范滇元,余文炎. 高功率多程放大器. *中国激光*, 1980, 7(9): 1~6

## Investigation of “Shengguang-Ⅰ” Main Amplifier

Zheng Yuxia Zhu Lian Qian Leijia Zhang Mingke Fan Dianyuan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

**Abstract** This paper reviews a new double-pass coaxial amplifier in  $2 \times 2$  array of “Shengguang-Ⅰ” main amplifier with a net aperture  $\phi 200$  mm. The experimental and theoretical results of a single beamline are given.

**Key words** double-pass coaxial amplifier, array