

# 口径 350mm 片状放大器的研制

唐贤忠<sup>1</sup>, 朱俭<sup>1</sup>, 马伟新<sup>1</sup>, 戴亚平<sup>1</sup>

陆锡南<sup>2</sup> 夏志强<sup>2</sup> 胡静芬<sup>2</sup> 柴志豪<sup>2</sup> 王仁贵<sup>2</sup> 朱宝强<sup>2</sup> 林尊琪<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>上海激光等离子体研究所, 上海, 201800; <sup>2</sup>中科院上海光学精密机械研究所, 上海, 201800)

**摘要:** 神光 II 第九路系统  $\Phi 350\text{mm}$  放大器, 要求有高增益系数、良好的光学质量、长期安全稳定性能和低廉的造价。在放大器的研制过程中应用了多种技术措施以提高放大增益, 包括光泵形式的比较和选择, 钕玻璃的种类, 浓度, 尺寸的选择, 寄生振荡的抑制和包边玻璃的设计, 高效氙灯的研制, 能源馈电系统的改进; 隔板玻璃的选材和 Sol-gel 宽频带减反膜的涂制, 角形反射器的设计和使用。通过无应力安装钕玻璃片, 提高激光器的光学质量。在安全稳定性能方面着重解决了氙灯防爆, 隔板玻璃防碎裂, 钕玻璃片防潮解和片腔内洁净度提高等问题。神光 II 第九路系统  $\Phi 350$  放大器已建成, 性能达到预期要求

**关键词:** 增益系数 寄生振荡 片腔内洁净度 光束质量

## The manufacture of $\Phi 350\text{mm}$ disk amplifier

TANG Xianzhong<sup>1</sup>, ZHU Jian<sup>1</sup>, MA Weixin<sup>1</sup>, DAI Yapin<sup>1</sup>, LU Xinan<sup>2</sup>,

XIA Zhiqiang<sup>2</sup>, HU Jingfen<sup>2</sup>, CAI Zhihao<sup>2</sup>, WANG Rengui<sup>2</sup>, ZHU Baoqiang<sup>2</sup>, LIN Zunqi<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Shanghai institute of laser and plasma, shanghai, 201800, China,

<sup>2</sup>Shanghai institute of fine mechanics and optic, shanghai, 201800, China)

**Abstract:** The  $\Phi 350\text{mm}$  amplifier of NO.9 laser of SHENGUANG II demands the high gain coefficient, the good beam quality, the safety and stable running and the low cost. The gain coefficient has been raised by the improvement of pump lamps form and energy feed system, the design of Nd: glass, the suppression of the parasitic oscillation, the use of corner reflector, protective glass with sol-gel anti reflection film and high efficiency xenon lamps. The beam quality has been improved by the non-stress install of Nd: glass disks. The stable running has been enhanced by the improvement of cavity merit rating. The amplifier has been manufactured and installed. The characteristics of No.9 System have reached the design requirement.

**Key words:** gain coefficient parasitic oscillation cavity merit rating beam quality

## 1 引言

通光口径  $\Phi 350\text{mm}$  片状放大器是目前国内口径最大的激光放大器, 是神光 II 装置第九路的重要单元, 四台放大器已建成并安装在线, 于今年四月份投入试运行。九路系统输出激光达到设计要求, 基频光为 3000J, 倍频光为 1500J, 九路系统在物理实验中用作 X 光背景照明并取得很好的结果。 $\Phi 350\text{mm}$  片状放大器

---

作者简介: 唐贤忠 (1944—) 男 浙江镇海人 上海激光等离子体研究所 长期从事高功率激光装置片状放大器的研制和运行工作。E-Mail: xianzhong\_tang@eyou.com

性能达到设计要求，增益系数  $\beta$  为  $0.0485\text{cm}^{-1}$ ，和日本 OSAKA 同类放大器  $0.049\text{cm}^{-1}$  相当。增益均匀性  $\Delta\beta/\beta < 0.01$ 。本放大器已达到实用要求，在进行上百次实验中，没有出现氙灯爆炸，钽玻璃片潮解和因灰尘而造成的破坏。良好的氮气冷却系统，使放大器的工作频率达到每次 2 小时。

## 2 放大器的小信号增益系数 $\beta$ 和增益 $G$

### 2.1 泵浦形式

图 1 两种光泵形式，平面泵浦和圆周泵浦。如两者的灯距一致，平面泵浦灯数仅仅为圆周泵浦的一半，费用节约是明显的。平面泵浦的利用效率很高，增益系数可以做的较高。神光 II 主放大器采用平面泵浦增益系数  $\beta$  达到  $0.06\text{cm}^{-1}$ 。平面泵浦的均匀性也可以做的很好，经过测试  $\Phi 350\text{mm}$  放大器的  $\Delta\beta/\beta < 0.01$ 。另外由于氙灯的数量和光泵能量减少，光泵热畸变相应的减少，热畸变恢复时间缩短，发射频率提高。我们采用平面泵浦，每边氙灯各 14 支，氙灯参数为  $\Phi 22\text{mm} \times 1270\text{mm}$ 。

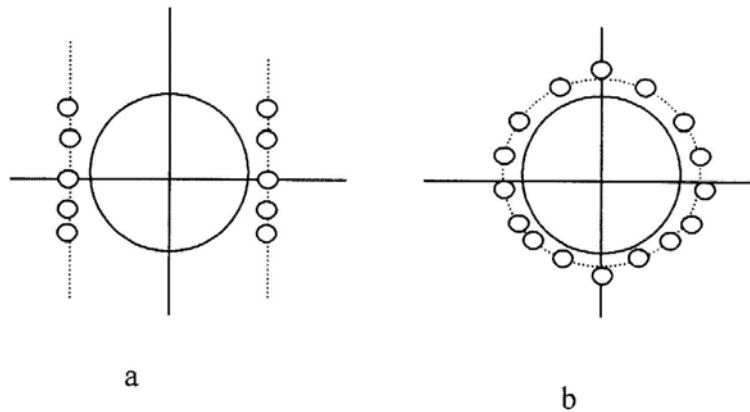


Fig1: Two kind of pump (a)plane pump (b)circle pump

图 1: 两种泵浦方式 (a) 平面泵浦 (b) 圆周泵浦

### 2.2 钽玻璃

N31 型磷酸盐激光玻璃是上海光机所新研制的激光玻璃，获上海市一等奖<sup>[1]</sup>。其性能相当于日本的 LHG—8，受激辐射截面  $\sigma = 4.0 \times 10^{-20}\text{cm}^2$ ，(N21 的  $\sigma = 3.21 \times 10^{-20}\text{cm}^2$ ) 其  $\beta$  比 N21 的高 50~60%。N31 是  $\Phi 350$  放大器的首选激光玻璃。

$\text{Nd}_2\text{O}_3$  浓度有两种选择:2.2wt%和 3.0wt%。2.2wt%的荧光寿命为 340ns,3.0wt

%的  $\tau=320\text{ns}$ ，荧光寿命长有利于翻转粒子数  $\Delta n$  的积累和  $\beta$  提高。钽玻璃掺杂浓度的选择要和钽玻璃的厚度光泵强度统一考虑。

$\Phi 350$  放大器钽玻璃片的厚度  $l$  为  $4.5\text{cm}$ ，可使  $G$  达到较大值。因为小信号增益系数  $G=e^{\beta l}$ ；大面积片要保证面形，就必须达到一定的厚度要求。为使钽玻璃片泵浦均匀，故选择  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  的浓度为  $2.2\text{wt}\%$ 。

### 2.3 钽玻璃片的包边和寄生增益的抑制

对于大口径片状放大器影响增益系数的另一个因素是寄生振荡的抑制和包边的质量。

当荧光在钽玻璃侧面反射，反射率  $R \cdot e^{D\beta} > 1$  时，形成寄生振荡。式中  $R$  为钽玻璃片的侧面反射率， $D$  为钽玻璃片的长轴的长度。

$\Phi 350$  放大器的自振系数  $D\beta$  接近  $3.5$ ，极易发生寄生振荡和放大的自发辐射 ASE<sup>[2]</sup>，造成翻转粒子数  $\Delta n$  的逃逸和减少，使增益系数  $\beta$  减小。

寄生振荡分为两种模式。体寄生模：在平行平板钽玻璃片中是全反射锯齿波传播；表面寄生模：沿钽玻璃片表面传播。表面吸收氙灯较强， $\beta$  值较高。 $D\beta$  值较大，抑制表面寄生振荡，尤为重要。

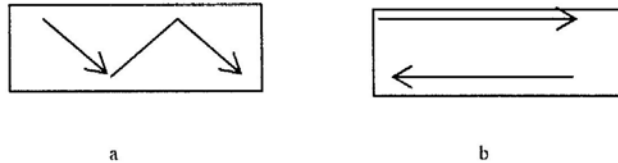


Fig2:two kind of parasitic oscillation (a) parasitic oscillation inside (b) parasitic oscillation on surface

图 2：二种寄生振荡模式 (a) 体寄生 (b) 表面寄生

抑制和减少寄生振荡的有效方法是钽玻璃侧面包一层对  $1.053\mu\text{m}$  强吸收掺氧化铜的玻璃，使边界反射率  $R$  尽量减小。

如包边质量有问题出现亮线和脱胶，侧面反射  $R$  将达到  $0.044$ ， $R \cdot e^{3.5} = 1.46 > 1$ ，形成寄生振荡。研制中  $3501$  放大器有一块包边局部脱胶，使  $\beta$  下降至  $0.037$ ，因此包边的质量十分重要。钽玻璃侧面包边后剩余反射率为  $R$ ，见图 3：

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (1)$$

$$R_1 \cong R_2 = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (2)$$

$$R_3 \cong \left( \frac{n_3 - 1}{n_3 + 1} \right)^2 e^{-2\alpha_3 l_3} \quad (3)$$

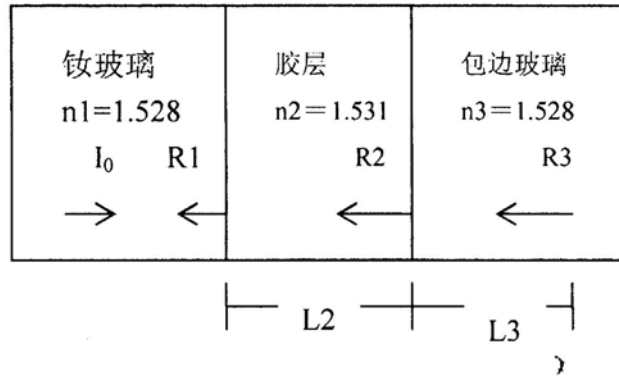


fig3:the reflect from lateral surface

图 3:钽玻璃片的侧面包边后剩余反射

式中的  $\alpha_3$  为包边玻璃对 1.053nm 光的吸收系数,  $l_3$  包边玻璃的厚度。由于胶层折射率和钽玻璃片, 包边玻璃折射率不匹配而引起的剩余反射  $\Delta R_1$ ,  $\Delta R_1 = R_1 + R_2 = 2.8 \times 10^{-6}$ 。由于包边玻璃的吸收系数  $\alpha_3$  有限造成的剩余反射  $\Delta R_2$ 。

$$\Delta R_2 \cong R_3 \quad (4)$$

$\alpha_3 = 0.4 \text{mm}^{-1}$ ,  $l_3 = 6 \text{mm}$ ,  $\Delta R_2 = 3.6 \times 10^{-4}$ ,

侧面剩余反射  $R = \Delta R_1 + \Delta R_2 = 3.6 \times 10^{-4}$ , 从理论设计来看 剩余反射 R 值很小。但由于包边工艺问题, 胶合面存在气泡灰尘脱胶亮线等疵病, 实际的剩余反射率 R 大于理论值。要使大口径片状放大器获得较高的增益和抑制寄生振荡, 必须提高包边工艺。另外在物理设计上我们也做了一些改进。

## 2.4 氙灯和氙灯的电光效率

氙灯的电光效率, 安全因素, 紫外光的截止, 价格, 寿命等都是选择氙灯参数的出发点。这些参数主要是管材、壁厚、内径、极间距、氙压等。

光机所光源中心特别为  $\Phi 350$  放大器研制的高气压氙灯, 具有较高的电光效率 71.9~75.6%, 为  $\Phi 350$  放大器  $\beta$  值提高作出了贡献<sup>[3]</sup>。见表 1,  $\eta$  为辐射能和电容储能之比。

Table 1: the ratio of radiant energy and capacitance energy

表 1:  $\eta$  为辐射能和电容储能之比

V(KV)	16	18	20	21	22	23
$\eta$	75.3	75.6	75.0	73.0	72.4	71.9

## 2.5 能源馈电系统

氙灯放电波形的控制, 粗径电缆和预主脉冲馈电系统的使用, 对提高光泵能量的利用效率和  $\beta$  是有益的。在实验中改变馈电常数, 监测放大器的增益, 电容量分别为 100 $\mu$ f, 120 $\mu$ f, 140 $\mu$ f, 电感分别为 100 $\mu$ H, 300 $\mu$ H。

Table 2: the experimental date on the sample of  $\Phi$ 350表 2:  $\Phi$ 350 样机上的实验数据 (实验样机上一块包边玻璃破碎 G 值较小)

capacitance	inductance	voltage	Electro-discharge pluse	Electric current	Gain coefficient G
100 $\mu$ f	300 $\mu$ H	22KV	4.78 $\mu$ s	5167A	1.49
120 $\mu$ f	300 $\mu$ H	22KV	510 $\mu$ s	5905A	1.49
140 $\mu$ f	300 $\mu$ H	22KV	557 $\mu$ s	6459A	1.50~1.51

表 2 所示, 增加电容对提高增益 G 的作用并不明显, 可能脉冲过宽, 光泵浦能量的利用率不高或者电流密度过大, 氙灯光蓝移, 适合钎玻璃吸收带的氙灯光强度增加的不多; 或者氙灯放电时等离子密度过稠, 对氙灯光的吸收增加。或者这三个原因都在起作用。根据实验结果, 最后确定的参数是  $C=100\mu$ f,  $H=250\mu$ H。在试运行中, 氙灯的安全性和电光效率都达到了使用要求。

## 2.6 隔板玻璃和 Sol-gel 减反膜

隔板玻璃用作片腔的屏蔽玻璃, 使片腔保持很高的洁净度; 防止氙灯光产生的冲击波的破坏。氙灯光对钎玻璃的泵浦是通过隔板玻璃入射的, 隔板玻璃的透过率的高低直接影响光泵效率和  $\beta$ 。

要求隔板玻璃的光吸收系数小, 耐热冲击, 耐光辐射性能好, 机械强度高。Schott 公司的 Borofloat33 玻璃满足上述要求。涂 Sol-gel 减反膜, 白光透过率达 96~98%, 对提高光泵效率的作用是很明显的。Sol-gel 膜在强光和高温条件下性

能，是我们重点考核的项目。经过多次实验，通过对样品的透过率测量，片腔内洁净度的测量，确认 Sol-gel 膜在强光辐射时不剥落、不汽化、不污染，才能实际使用在放大器上。至今， $\Phi 350$  放大器工作逾百次，隔板玻璃上的 Sol-gel 膜，没有出现损伤破坏现象。

## 2.7 角反射器

角反射器的采用是为了提高氙灯背面光的利用率。我们比较了平面反射器，渐开线反射器和角反射器。根据氙灯间隔，灯的直径等具体数据，我们选择了角反射器。工艺比较简单造价较低，氙灯光利用率较高。氙灯背面光可利用部分的辐射角为  $2\beta$ ，平面反射器的  $2\beta$  仅为  $18.4^\circ \times 2$ ，角反射器的  $2\beta$  达到  $46.6^\circ \times 2$ ，当然氙灯背面光，经氙灯等离子体的吸收和折射，不能全利用，但角反射器对提高  $\beta$  是有益的。

## 3. 放大器的光学质量和钹玻璃片的无应力安装

为使放大器的光学质量有保证，对钹玻璃片和其他光学元件的材料质量和面形加工提出极高的要求。但第九路系统激光介质长度为 4044mm，光学面达到 108 个，故光束质量要求做的很高是十分困难的。钹玻璃片的应力将造成双折射和光束质量的下降，还使激光出现退偏，能量损耗增加。钹玻璃片的应力来源有三方面（1）退火应力要求为  $2\text{nm/cm}$ 。（2）包边应力，要求  $3\text{nm/cm}$ 。（3）机械安装应力，设计片框和安装工艺时要避免此应力的出现。

我们采用一种新型结构，多个弹性头子侧面均匀固定，实现了钹玻璃片的无应力安装。用平面干涉仪对已安装的钹玻璃片进行测量，没有发现附加的应力和应变。

## 4 安全稳定运行性能

高功率激光装置，从科研转到实用，要提高器件的安全稳定性能

### 4.1 氙灯防爆

在氙灯设计中，氙灯储能参数的选择，如直径、电弧长度、管材壁厚、氙压灌输能量、电流波形，都关系到氙灯的效率，也影响氙灯的安全。二者之间必须权衡，力争要安全放电。

$F_x$  是氙灯输入能量和爆炸能量的比值。控制  $f_x$  值是实现氙灯安全工作的前提，我们取  $f_x = 0.2 \sim 0.25$ 。氙灯制作工艺的改进，氙灯验收的规范，使氙灯质量

有了保证。氙灯的安装，既要安装牢，又要安装无应力，我们设计的小鸟式固定装置，满足了上述要求，且安装方便快捷。氙灯放电时的洛伦兹力是造成氙灯爆炸的原因之一。我们用控制电流方向的办法，使洛伦兹力抵消和减小。氙灯列阵边缘灯，采用 dummy 灯，防止洛伦兹力的破坏。控制电流波形，防止峰值电流过大而造成氙灯爆炸。采用了上述措施，达到了预期效果

#### 4.2 钽玻璃片的防潮解

N31 是磷酸盐玻璃系列，含有较多的碱金属氧化物，化学稳定性差，在大气中受水蒸气的影响形成侵蚀性潮解斑，影响放大器的正常工作，使放大器增益系数下降和光束质量变差。

钽玻璃备品需放在电子干燥柜中。在线放大器中钽玻璃片防潮解：(1) 改善片腔的密封性 (2) 每天 24 小时充氮气保护，纯氮的含水量 < 1PPM。我们经常监测片腔内的相对湿度，使钽玻璃片置于干燥环境中。

#### 4.3 钽玻璃片腔内的洁净度的测量和提高

片腔内洁净度即灰尘颗粒的含量关系到钽玻璃片的安全和光束质量的好坏。如果钽玻璃片表面附着灰尘，气溶胶沉淀物，污点等，在氙灯和激光照射下，急剧升温形成微点爆炸，造成钽玻璃表面的损坏。避免此情形发生的唯一的方法就是提高腔内的洁净度和进行超净安装。片腔要采用优质不锈钢，防止材料化学不稳定性而污染腔内的洁净度。超净清洗工艺改进，使片腔内的洁净度有了保障。片腔内的洁净度的监测，使我们对腔内的洁净度有了量化的概念。良好的氮气系统使气溶胶及时驱走，使当光泵时的几十万级洁净度很快恢复到正常。

经我们多年努力使片腔的洁净度有了明显的提高，优于百级甚至优于 10 级，使钽玻璃片的工作寿命大大延长。

Table 3: the result of measure brilliance on Φ350 amplifier

表三： Φ350 放大器洁净度测量结果

	The time of measurement	The number of dust in the cavity						Cavity Merit rating
		0.3μm	0.5μm	0.7μm	1.0μm	2.0μm	5.0μm	
First	10min	0	0	0	0	0	0	4/3 better than 2 degree
Second	10min	1	0	0	0	0	0	

Third	10min	4	4	1	0	0	0	
-------	-------	---	---	---	---	---	---	--

## 5 结语

口径  $\Phi 350\text{mm}$  片状放大器的研制是成功的，达到了设计要求和实用要求。一些探索和创新是有效的。还发现一些不足之处和改进方向，有利于以后改进和提高。

### 参考文献

- [1]胡丽丽，蒋中宏 磷酸盐激光玻璃研究进展 [J]. 硅酸盐通报 2005  
5 :125~129
- [2]W.Koechner. solid-state laser engineering [M] Beijing science press :169~170  
W.克西奈而 著 固体激光工程[M]北京科学出版社:169~170
- [3]刘建军 蒋宝财 唐贤忠等 细长型高功率脉冲氙灯研究 已被《中国激光》  
录用，待发表。