

# 多段式钕玻璃板条激光放大器小信号增益系数和储能效率的实验研究\*

冯国英 吕百达 叶一东 蔡邦维 淳于咏梅 隋展 张小民  
(四川大学激光物理与激光化学研究所, 成都 610064) (中物院核物理与化学研究所, 成都 610003)

**摘要** 用阈值法和行波放大法对我们自行设计、加工的新型多段式钕玻璃板条激光放大器的小信号增益系数和储能效率作了测量, 结果表明, 放大器储能效率可达 3.84%, 比常规放大器更高; 此外, 还具有向高功率、高光束质量发展的潜在优点。

**关键词** 多段式板条激光放大器 储能效率 阈值测量 行波放大

**ABSTRACT** By measuring threshold and using traveling wave amplification, the small signal gain coefficient and storage efficiency of a novel multi-slab Nd: glass laser amplifier designed and fabricated by us have been determined experimentally. It has been shown that a storage efficiency of 3.84% has been achieved in the use of this amplifier, which is higher than that of the conventional amplifier. Furthermore, the multi-slab laser amplifier has the potential advantage of providing the high power and good beam quality.

**KEY WORDS** multi-slab laser amplifier, storage efficiency, measuring the threshold, traveling wave amplification

## 0 引言

采用“之”字形光路的板条状工作物质较易得到好的泵浦均匀性和热分布, 为获得好的光束质量打下了基础。钕玻璃板条可做到表面积较大, 有更好的散热性和热负载能力, 适合作大功率器件。研制效率高、增益均匀性好、热畸变小钕玻璃放大器是很有价值的课题。美国劳伦兹—利弗莫尔国家实验室(LLNL)已研制成了输出能量 22J、脉冲宽度 12ns、重复频率为 3Hz 的钕玻璃板条再生放大器<sup>[1]</sup>; 俄罗斯瓦维洛夫光学所也采用堆迭的钕玻璃板条制成了重复频率为 2Hz、输出能量达 100J 的放大器组件<sup>[2]</sup>。目前, 国内尚未见多段式钕玻璃板条放大器的研究报告。我们自行设计、加工了多段式钕玻璃板条放大器, 并用阈值法和行波放大法测量了小信号增益系数和储能效率, 还与“星光 II”激光装置上使用同种材料的棒状放大器的有关实验结果作了比较。

## 1 实验装置

### 1.1 多段式板条激光放大器结构

我们的多段式板条激光放大器模型采用有创新特色的光炉式结构, 如图 1 所示。三根

\* 中国工程物理研究院科学技术基金和国家高技术惯性约束聚变领域资助项目。

1995年6月15日收到原稿, 1995年11月30日收到修改稿

板条和四组氙灯相间排列。三根板条分别编号为 1#、2#、3#，装板条的三个位置分别设为 slab-1、slab-2、slab-3(图 1)，中间位置 slab-2 与两侧位置 slab-1、slab-3 的泵浦有差别。

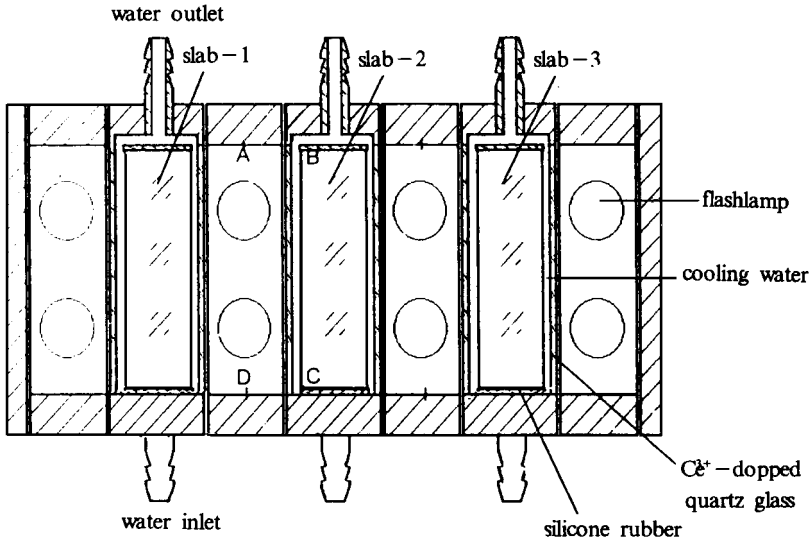


Fig 1 A schematic diagram of the multi-slab laser amplifier

图 1 多段式板条激光放大器示意图

板条介质材料是从星光装置使用过的  $\Phi 70\text{mm}$  放大器棒状介质切割由我们自行加而成的，为硅酸盐钕玻璃 ( $N_{0312}$ )，折射率  $n=1.5122$ ，板条尺寸  $38\text{mm} \times 18\text{mm} \times 300\text{mm}$ ，两端面与泵浦面夹角加工成  $36^\circ$ ，板条全水冷，氙灯在空气中自然冷却，氙灯极间距为  $21.5\text{cm}$ 。泵浦腔为矩形聚光腔，反射面为抛光的铝箔。氙灯每组两支，共八支，每四支灯串联用一组电源供电。八支灯的输入电能及灯的效率相同，由于腔壁的反射，两边的板条得到的泵浦光强于中间的板条，可以等效看成分别有三支灯对两边的每根板条进行泵浦，有两支灯对中间的板条进行泵浦。为便于比较，我们将同一根板条分别置于中间和旁边位置，比较两处的储能效率。

水窗为掺铈石英玻璃片，它对  $0.4\mu\text{m}$  以下波长的光有较强的吸收，可将有害的紫外光转换为可被板条介质利用的光能，达到滤光和提高效率的双重目的。

## 1.2 能源系统

使用容量相同的两组储能电容分别对两组氙灯(每组四支串联)充电，每组储能电容  $140\mu\text{F}$ (由四只  $140\mu\text{F}$  电容两两相并再相串而成)，运行电压为  $3500\text{V} \sim 9000\text{V}$ 。单次脉冲工作，脉冲间隔 10 分钟。

## 1.3 测量系统

在用阈值法测量小信号增益系数和作为振荡器测输出能量时，使用 A POLLO 能量卡计并加上  $1.06\mu\text{m}$  窄带滤光片(滤掉漏出腔外的氙灯光)测激光能量。在行波法测放大倍数和储能效率中，使用了 A POLLO 卡计和另一个国产能量卡计。

## 2 用阈值法测小信号增益系数和储能效率

### 2.1 实验原理

板条一端置  $R_1 = 100\%$  的全反镜, 另一端置反射率为  $R_2$  的输出镜, 构成平平腔, 腔长为  $77\text{cm}$ 。实验中先后使用了二只输出镜, 反射率分别为  $R_2 = 90.9\%$ ,  $R_2 = 50.3\%$ 。调整泵浦电压使之刚好起振。在阈值附近, 增益与损耗达到平衡, 忽略腔的衍射损耗等因素, 有<sup>[3]</sup>

$$R_1 R_2 e^{2(g_0 l - \alpha)} = 1 \tag{1}$$

式中,  $g_0$  为小信号增益系数;  $\alpha$  为激光介质的损耗系数;  $l$  为增益长度;  $L$  为介质损耗长度。由此可得小信号增益系数

$$g_0 = \frac{1}{l} \left[ -\frac{1}{2} \ln(R_1 R_2) + \alpha \right] \tag{2}$$

又因为

$$g_0 = \frac{E_{st}}{E_s} = \frac{E_p \eta_t}{E_s} \tag{3}$$

进一步可求得储能效率, 即储能密度与泵浦密度之比

$$\eta_t = \frac{E_{st}}{E_p} = \frac{g_0 E_s}{W_p / V} \tag{4}$$

式中,  $E_{st}$ 、 $E_p$  分别为储能密度和泵浦密度,  $E_s$  为饱和通量,  $W_p$  为泵浦能量,  $V$  为介质的泵浦体积。若设腔的衍射损耗为  $\rho$ , 则(1)式可写为

$$\rho R_1 R_2 e^{2(g_0 l - \alpha)} = 1 \tag{5}$$

$$\rho R_1 R_2 e^{2(g_0 l - \alpha)} = 1 \tag{6}$$

联立式(3)、(5)和(6), 有

$$\eta_t = \frac{E_s \ln \frac{R_2}{R_1}}{2l(E_p - E_s)} \tag{7}$$

## 2.2 实验结果和分析

在本实验中,  $\alpha = 0.004\text{cm}^{-1}$ ,  $l = 23.35\text{cm}$ ,  $L = 29.1\text{cm}$ ,  $V = 147\text{cm}^3$ ,  $R_1 = 100\%$ ,  $R_2 = 90.9\%$ ,  $R_2 = 50.3\%$ ,  $E_s = h\nu/\alpha$

板条置于旁边位置, 对应于输出镜  $R = 90.9\%$ 、 $50.3\%$  的起振阈值电压分别为  $3800\text{V}$  和  $5500\text{V}$ , 可得相应的小信号增益系数  $g_0$  分别为  $0.0070\text{cm}^{-1}$  和  $0.0197\text{cm}^{-1}$ 。二个输出镜对应的阈值电压泵浦下的储能效率分别为: 不考虑腔的衍射损耗, 对  $R = 90.9\%$ ,  $\eta_t = 2.25\%$ ; 对  $R = 50.3\%$ ,  $\eta_t = 3.18\%$ ; 利用式(7), 考虑腔的衍射损耗, 可得旁边板条的储能效率为  $\eta_t = 3.27\%$ 。

对置于中间位置的板条, 对应于输出镜  $R = 90.9\%$  和  $50.3\%$  的起振阈值电压分别为  $4100\text{V}$  和  $6000\text{V}$ , 可得相应的小信号增益系数  $g_0$  分别为  $0.070\text{cm}^{-1}$  和  $0.0197\text{cm}^{-1}$ 。阈值电压泵浦下的储能效率分别为: 不考虑腔的衍射损耗, 对  $R = 90.9\%$ ,  $\eta_t = 2.25\%$  对  $R = 50.3\%$ ,  $\eta_t = 3.18\%$ ; 利用式(7), 考虑的衍射损耗, 可得中间板条的储能效率为  $\eta_t = 3.84\%$ 。

所以, 考虑腔的衍射损耗, 用阈值法测得板条在中间位置的储能效率为  $3.84\%$ , 旁边位置为  $3.27\%$ 。在较小的电压变化范围内忽略储能效率随电压的变化, 可以计算在不同泵浦电压下板条在旁边位置(储能效率为  $2.53\%$ )和中间位置(储能效率为  $3.18\%$ )的储能密度  $E_{st}$ 、小信号增益系数  $g_0$ 、单程增益  $G_s$  等参数, 见表 1、表 2。

表1 旁边板条的  $g_0$  和  $E_{st}$  的计算值

Table 1 Calculated  $g_0$  and  $E_{st}$  for the side slab ( $\eta_{kt} = 2.53\%$ )

V/kV	$W_p/kJ$	$E_p/(J/cm^3)$	$E_{st}/(J/cm^3)$	$g_0/cm^{-1}$	$G_s$
4.0	0.840	5.71	0.145	0.01	1.124
5.0	1.313	8.93	0.226	0.016	1.293
6.0	1.890	12.86	0.325	0.023	1.523
7.0	2.573	17.50	0.443	0.032	1.879
8.0	3.360	22.86	0.578	0.042	2.373
9.0	4.253	29.93	0.732	0.053	3.068

表2 中间板条的  $g_0$  和  $E_{st}$  的计算值

Table 1 Calculated  $g_0$  and  $E_{st}$  for the middle slab ( $\eta_{kt} = 3.18\%$ )

V/kV	$W_p/kJ$	$E_p/(J/cm^3)$	$E_{st}/(J/cm^3)$	$g_0/cm^{-1}$	$G_s$
4.0	0.560	3.81	0.121	0.008	1.073
5.0	0.875	5.95	0.189	0.014	1.234
6.0	1.260	8.57	0.273	0.020	1.420
7.0	1.715	11.67	0.371	0.027	1.672
8.0	2.240	15.24	0.485	0.036	2.015
9.0	2.835	19.29	0.613	0.044	2.487

### 3 用行波放大法测小信号增益系数和储能效率

#### 3.1 实验方法

以一根板条作为振荡器,另一根板条和为放大器,使用行波放大法对 1# 和 3# 板条测量了它们在中间位置时的放大倍数随泵浦电压的变化,进而得到不同电压下的小信号增益系数和储能效率。实验装置如图 2 所示。图中,  $M_1$  是对  $1.06\mu m$  的全反镜;  $M_2$  是输出耦合镜,  $R = 78.5\%$ ; A 是矩形光阑, 通光孔径为  $5mm \times 5mm$ , 用以限制振荡光

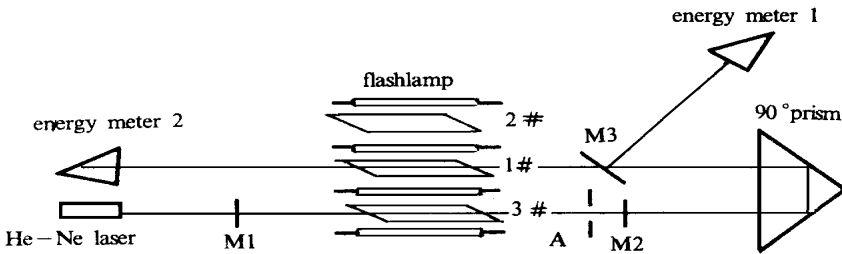


Fig 2 Measurement of the storage efficiency by using traveling wave amplification

图2 行波放大法测量储能效率示意图

束的尺寸; 直角棱镜把从振荡器出来的光反射到作为放大器的板条的输入端,  $M_3$  是分束镜, 对  $1.06\mu m$ , 光强反射率  $R = 84\%$ , 反射光进入能量卡计 1, 透射部分进入另一根板条进行放大, 然后进入卡计 2。卡计 1 离氙灯较远, 且与端口漏出的氙灯光角度较大, 氙灯光的影响可以忽略; 卡计 2 因正对漏出氙灯光的板条端口, 在其上加了一滤光片来消除氙灯光的影响, 该滤光片对  $1.06\mu m$  光的透射率为  $66.5\%$ , 其口径为  $\Phi 25mm$ 。设卡计 1 的读数为  $W_1$ , 卡计 2 的读数为  $W_2$ , 则放大器的输入能量  $W_{in}$  和输出能量  $W_{out}$  分别为  $W_{in} = \frac{1-R_3}{R_3}$

$W_1 = \frac{16\%}{84\%} W_2$ ,  $W_{out} = W_2 / 0.665$ 。放大器单程放大倍数

$$G = \frac{E_s}{E_{in}} \ln [1 + (e^{E_{in}/E_s} - 1) e^{g_0 l}] e^{-\alpha} = W_{out} / W_{in} \quad (8)$$

式中  $E_{in}$  是输入能量密度, 为输入能量  $W_{in}$  除以板条内光束横截面面积  $S$  ( $S = 0.27cm^2$ )

$$E_{in} = W_{in} / S \quad (9)$$

由此可得小信号增益系数

$$g_0 \frac{1}{l} \ln \left( \frac{\exp \left( \frac{E_{in}}{E_s} \cdot G \cdot e^{\alpha} \right) - 1}{\exp \left( \frac{E_{in}}{E_s} \right) - 1} \right) \quad (10)$$

利用式(4)进一步可得到储能效率。

### 3.2 实验结果和分析

实验中使用的激光介质,  $l = 23.35\text{cm}$ ,  $L = 29.1\text{cm}$ ,  $S = 0.27\text{cm}^2$ ,  $\alpha = 0.004\text{cm}^{-1}$ ,  $V = 147.1\text{cm}^3$ 。使用 3# 板条作振荡器, 1# 板条作放大器, 测得不同泵浦密度下的小信号增益系数和储能效率, 与“星光 II”装置上使用同种材料的棒状放大器行波放大的实验结果比较如图 3 所示。可以看出: 在相同泵浦密度条件下, 板条放大器的小信号增益系数和储能效率较棒状放大器的稍高。

钕玻璃的主吸收带在  $0.6 \sim 0.9\mu\text{m}$  之间, 如果增加闪光灯的输入能量, 则较大的电流密度会使辐射向蓝光方向移动, 其结果使泵浦源的效率降低。从图 3 可以看到, 随着泵浦密度的增加, 增益增大, 而储能效率却在下降。另外, 本实验中, 作为振荡源

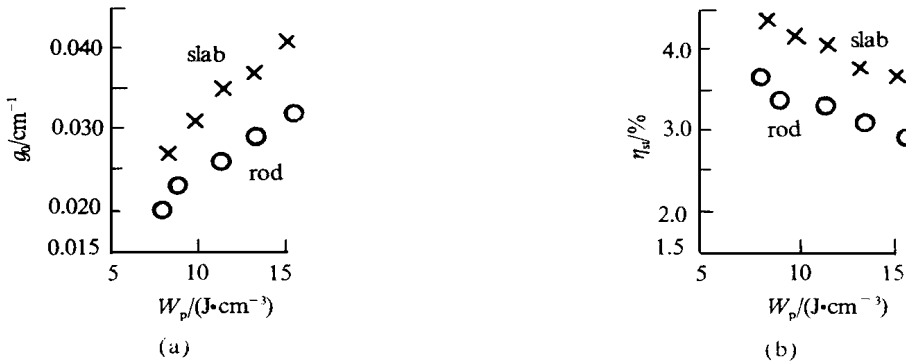


Fig. 3 The  $g_0$ (a) and  $\eta_{st}$ (b) of the multi-slab laser amplifier and Xingguang rod laser amplifier are plotted against the  $E_p$

图 3 板条和星光装置棒状放大器的(a)  $g_0$ 和 (b)  $\eta_{st}$ 随  $E_p$ 变化的比较

的板条与作放大用的板条均由同一组氙灯同时泵浦, 未达到放大的最佳时间匹配, 因此, 实际的放大倍数和储能效率还应大些。

### 4 小结

(1) 在本多段式板条放大器构型下, 中间的两组灯分别同时泵浦它两边的板条, 而两侧的两组灯分别只对靠近它的板条有贡献, 中间板条实际上等效于有两支灯对它泵浦, 旁边的每根板条等效于有三根灯泵浦, 中间的板条的储能效率比旁边的板条更高。

(2) 在目前的实验中, 用阈值法测得中间板条的储能效率  $\eta_{st} = 3.18\%$ , 两侧板条的储能效率  $\eta_{st} = 2.53\%$ ; 当考虑腔的衍射损耗后, 可得中间板条的储能效率  $\eta_{st} = 3.84\%$ , 两侧板条的储能效率  $\eta_{st} = 3.27\%$ ; 用行波放大法测得当泵浦能量为  $2.52\text{kJ}$  时中间板条的储能效率  $\eta_{st} = 3.55\%$ 。这种多段式的优点之一在于板条有大的受光面且能充分利用中间的四

支氙灯的泵浦光,故有较高的储能效率。从与“星光 II”激光装置上使用同种材料的棒状放大器行波放大的实验结果比较可以看出,在相同泵浦密度条件下板条放大器的小信号增益系数和储能效率较棒状介质放大器的稍高;另外,板条采用“之”字形光路,可有效地克服一阶热效应,因此具有向高功率、高光束质量发展的潜在优点。

(3)对大功率(或能量)输出器件来说,由于单灯辐射能量有限,用多灯排列降低对单灯的要求是可取的。

(4)本多段式结构简单、加工成本低,且很容易向横向和纵向发展成为大型列阵式板条放大器,则有相对多的板条处于中间位置以使总的储能效率提高。

### 参考文献

- 1 Miller JT et al In 1992 Conference on Laser and Electro-Optics, paper CTuE1
- 2 Yashing VE *Proc SPIE*, 1991, **1839**: 175~ 180
- 3 W. 克希奈尔著. 固体激光工程. 北京: 科学出版社, 1983

## MEASUREMENT OF SMALL SIGNAL GAIN COEFFICIENT AND STORAGE EFFICIENCY OF THE MULTI-SLAB Nd: GLASS LASER AMPLIFIER

Feng Guoying, Lü Baida, Ye Yidong, and Cai Bangwei

(*Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064*)

Chunyu Yongmei, Sui Zhan, and Zhang Xiaom in

(*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CEA P, Chengdu, 610003*)

It is known that zig-zag slab geometry solid-state lasers have the advantage of compensating the first-order thermal effects including thermal lensing, stress-induced birefringence and depolarization, which leads to high average power laser operation limited only by stress induced fracture of the laser medium and good beam quality independent of the pumping power. In this paper the experimental results for the multi-slab Nd: glass laser amplifier have been first reported. In the pumping cavity shown in Fig. 1, 3 Nd: glass Brewster-angled slabs of 38mm × 18mm × 300mm and 8 flashlamps were installed. The slabs were cooled by flowing water. The flashlamps were cooled by flowing air. By measuring the threshold and using traveling wave amplification, the small signal gain coefficient and storage efficiency of the multi-slab Nd: glass laser amplifier have been determined. The main experimental results are compiled in Fig. 3 and Tabs. 1, 2. We have shown that small signal gain coefficients  $g_0$  from 0.01cm<sup>-1</sup> to 0.053cm<sup>-1</sup> at pumping energies from 0.84kJ to 4.253kJ for the middle slab, and  $g_0$  from 0.008cm<sup>-1</sup> to 0.044cm<sup>-1</sup> at pumping energies from 0.56kJ to 2.853kJ for the side slab have been obtained. Storage efficiencies  $\eta_s$  of 3.84% for the middle slab and  $\eta_s$  of 3.27% for the side slab have been achieved, which are higher than those of the conventional rod amplifier at Xingguang laser fusion facility. Further experiments are under way.