

文章编号: 0258-7025(2001)11-0961-05

## 单口径片状放大器光束波前畸变热恢复研究\*

於海武 郑万国 王成程 唐 军 贺少勃 刘 勇 淳于咏梅 王 琳

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 高温高密度等离子体物理国家级重点实验室 绵阳 621900)

**摘要** 给出了在单口径片状放大器(SSA)实验平台上利用哈特曼波前传感器进行热恢复研究的实验结果。结果表明, 三片长的 SSA 双程最大热波前畸变约为  $1.1\lambda$  峰谷(P-V)和  $0.13\lambda$  均方根梯度(RMS)( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )。实验结果与模拟计算结果进行了相互校核, 两者符合得较好。

**关键词** 片状放大器, 光束波前, 热畸变, 哈特曼波前传感器

中图分类号 TL 632+.1 文献标识码 A

### Investigation of Thermal Recovery of Wavefront Distortion of the Single-segment Amplifier

YU Hai-wu ZHENG Wan-guo WANG Cheng-cheng TANG Jun  
HE Shao-bo LIU Yong CHUNYU Yong-mei WANG Lin

(Laser Fusion Research Center, National Key Laboratory for Laser Fusion,  
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900)

**Abstract** The experimental results of the thermal recovery of the wavefront distortion using the single-segment amplifier (SSA) test bed and the Hatamann wavefront sensor are reported. The results indicate that the largest values of peak-to-valley and RMS of the optical wavefront are  $1.1\lambda$  and  $0.13\lambda$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ), respectively. The experimental results agree well with the numerical simulations.

**Key words** slab amplifiers, optical wavefront, thermo-optical distortions, Hatamann wavefront sensor

目前, 用于惯性约束聚变(ICF)研究的激光驱动器大多是高功率固体钕玻璃激光系统, 比如在建的美国利弗莫尔实验室的国家点火装置(NIF)、法国里梅尔实验室的兆焦耳激光装置(LMJ)等。这些激光系统都采用了组合式片状放大器(MSA)多程放大结构, 从而有效地提高了整个系统的能量转换效率。但是这种片状增益介质工作方式给装置的冷却带来了很大困难, 严重制约了装置的运行频率。因此, 放大器热效应研究已得到了足够的重视<sup>[1-4]</sup>。目前, 我国的神光-II 激光装置已采用了片状放大器, 下一代高功率固体激光装置也将采用片状放大器结构。但从我们所掌握的资料来看, 目前国内还没有对片状放大器的热恢复问题做过系统的研究。文献[5]利用二维解析方法研究了神光装置上棒状

放大器的热恢复问题。由于片状放大器激光增益介质的特点, 必须对钕玻璃片进行三维热分析。我们已建立了片状放大器的三维热效应模型, 并对组合式片状放大器的热恢复(包括温度恢复以及波前畸变恢复)过程进行了详细的模拟计算<sup>[6,7]</sup>。

本文给出了在单口径片状放大器(SSA)实验平台上利用哈特曼波前传感器进行的热恢复实验研究结果, 并与业已发展的片状放大器全三维热-弹性-光学波前畸变模型的计算结果进行了校核。实验与理论计算的结果符合得较好。

### 1 三维热-弹性-光学波前畸变模型简介

组合式片状放大器在工作过程中, 氙灯抽运能量的绝大部分以热量的形式沉积在放大器的各个部件上, 特别是氙灯壁、隔板玻璃和钕玻璃片等<sup>[1,2]</sup>;

\* 国家 863-416 主题(课题号: 416-2-1.3)资助项目。  
收稿日期: 2000-07-28; 收到修改稿日期: 2000-10-18

由于抽运腔的结构特性以及片内放大自发辐射 (ASE)加热铍玻璃片边缘包边的缘故,铍玻璃片内的初始温度分布是不均匀的;因此,氙灯放电结束后,氙灯、隔板玻璃、铍玻璃片以及放大器腔内的其他部件之间通过对流、辐射和热传导等过程进行热量交换,建立热平衡态。

当铍玻璃片内存在温度梯度分布时,会引起片的机械变形和热应力分布,由于折射率是温度和应力的函数,  $n = n(T, \sigma)$ , 所以片的机械变形和折射率的改变使得铍玻璃片引入的光程(OPL)分布不均匀

$$OPL = \int n(x, y, z) d\vec{s}(x, y, z) \quad (1)$$

$$n(x, y, z) = n_0 + \frac{\partial n}{\partial T}(T - T_0) + \frac{\partial n}{\partial \sigma} \cdot \sigma \quad (2)$$

式中  $n_0$  为铍玻璃片在常温下的均匀折射率,  $\partial n/\partial T$  为温度折射率系数,  $\partial n/\partial \sigma$  为应力光学系数张量。为了确定光束波前的变化,必须确定温度、变形以及热应力的分布,如图 1 所示。我们已在文献[6]中对该模型做了详细介绍,这里不再详述。

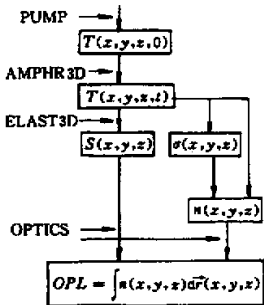


图 1 片状放大器三维热-弹性-光学波前畸变模型  
Fig.1 3D Model of thermo-elasto-optical wavefront distortion of slab amplifiers

## 2 计算结果

SSA 结构示意图如图 2 所示。铍玻璃片初始温度分布的计算采用了二维抽运腔光传输模型,利用光线追迹法计算了氙灯抽运光在铍玻璃片片厚各层面上的分布,由于片腔内采用了上下底板银反射器,因此假设片高度方向的初始温度分布是均匀的。铍玻璃片的侧部包边的初始温升约为 4℃,上下底部包边的初始温升约为 3℃<sup>[2]</sup>。片抽运区域片厚方向的初始温度分布如图 3 所示。铍玻璃片的初始温度分布计算结果与文献[1,3]给出的结果基本一致。

为了与 SSA 热效应实验结果互相校核,这里给

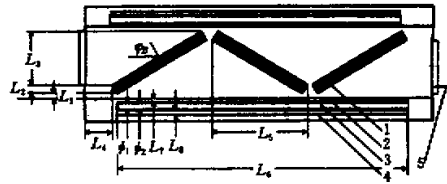


图 2 单口径片状放大器示意图  
Fig.2 Schematic of the single-segment amplifier

1: laser slab; 2: blastshield; 3: flashlamp;  
4: reflector; 5: window  
 $L_1 = 2.1 \text{ cm}, L_2 = 3.2 \text{ cm}, L_3 = 26.6 \text{ cm}, L_4 = 22.5 \text{ cm}, L_5 = 42.8 \text{ cm}, L_6 = 128.8 \text{ cm}, L_7 = 0.9 \text{ cm}, L_8 = 1.0 \text{ cm}, \phi_1 = 2.9 \text{ cm}, \phi_2 = 2.4 \text{ cm}, \phi_0 = 56.8^\circ$

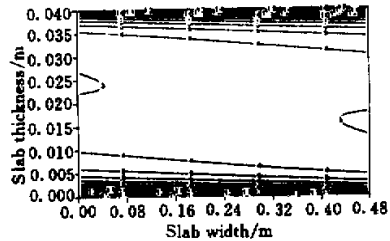


图 3 铍玻璃片抽运区域片厚方向的初始温升分布  
Fig.3 Initial temperature rise above the ambient along the slab thickness over the pump area

出了 SSA 被动冷却热恢复过程的部分模拟结果。边界条件确定如下:被动冷却时,氙灯箱内的自然对流换热系数约为  $2.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,铍玻璃片边缘包边与片框之间的热交换系数约为  $2.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ 。根据 SSA 的结构参数,计算了铍玻璃片与隔板玻璃之间以及端部铍玻璃片与端部窗口玻璃之间的辐射角因子,并给出了它们之间的辐射换热系数;铍片至隔板的辐射换热系数  $h_r = 2.52 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,隔板至铍片的  $h_r = 2.04 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;端部铍片至窗口的  $h_r = 0.41 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,窗口至端部铍片的  $h_r = 0.66 \text{ W/m}^2\text{K}$ 。放大器片腔内的自然对流换热系数为  $h_{NC} = 0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ (片腔是指铍玻璃片、隔板玻璃以及上下底板反射器所形成的围界),这一自然对流给出的换热量约为铍玻璃片与隔板玻璃之间辐射换热量的 20%,这与文献[1]的计算结果相一致。

利用集总热容模型,图 4 和图 5 给出了氙灯壁、隔板玻璃以及铍玻璃片的温升随时间的变化关系,其中铍玻璃片的整体平均温度约在 12 h 后恢复到实验大厅的环境温度<sup>[4]</sup>。由图 4 和图 5 可以清晰地

看出,在热恢复的开始一段时间内,氙灯壁向隔板玻璃辐射传热、再由隔板玻璃向敏玻璃片辐射传热,当隔板玻璃的温度低于敏玻璃片表面的温度时,后者

向前者辐射传热。图 6 为两个典型时刻的敏玻璃片表面的温度分布,其中片厚方向的温度梯度已基本得到恢复(敏玻璃片尺寸是 48 cm×24 cm×4 cm)。

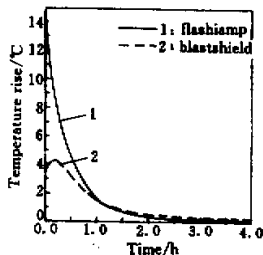


图 4 氙灯和隔板玻璃的升温随时间的变化关系  
Fig. 4 Time related temperature rise of the flashlamp and blastshield

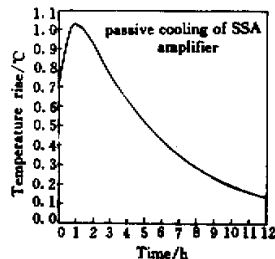


图 5 敏玻璃片平均温度随时间的变化关系(含包边)  
Fig. 5 Time related average temperature of the laser slab (including edge claddings)

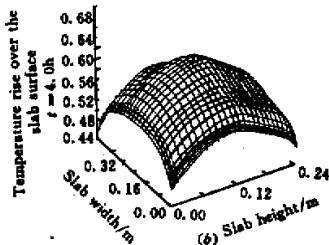
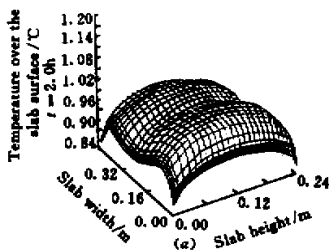


图 6 不同时刻敏玻璃片表面的温度分布(片厚方向温度分布已基本均匀)

Fig. 6 Typical temperature distributions over the slab aperture at different time ((a) 2.0 h; (b) 4.0 h)

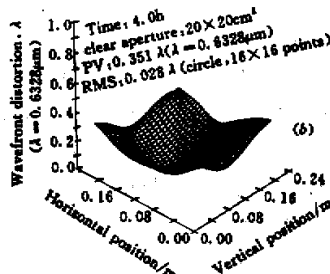
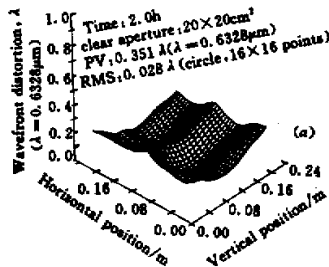


图 7 SSA 热恢复不同时刻的光束波前

Fig. 7 Wavefront at different time during the thermal recovery of SSA ((a) 2.0 h; (b) 4.0 h)

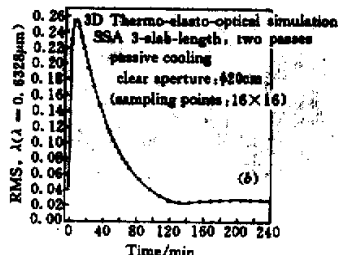
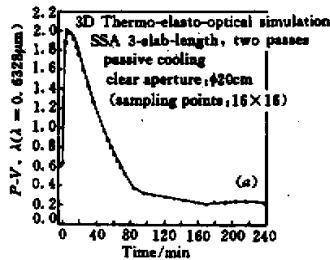


图 8 SSA 光束波前畸变的恢复过程

Fig. 8 Thermal recovery of SSA wavefront distortion

(a) P-V value; (b) RMS value

SSA 为三片长、双程结构, 铍玻璃片以布鲁斯特角放置, 去除包边之后铍玻璃片在光束方向的投影口径(硬口径)约为  $25\text{ cm} \times 23\text{ cm}$ , 为了和  $\phi 20\text{ cm}$  口径的哈特曼波前传感器的实验结果相互校核, 图 7 给出了  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  净口径范围内的光束波前

畸变。图 8 给出了光束波前  $P$ - $V$  值(峰谷值)和 RMS 值(均方根梯度值)随时间的变化关系, 其中 RMS 值的取样点与哈特曼微透镜阵列数一致。模拟计算中采用的 SSA 结构参数如图 2 所示,  $N_{31}$  铍玻璃材料的主要物理参数如表 1 所示。

表 1 三维热-弹性-光学模拟使用的  $N_{31}$  材料部分参数

Table 1 Parameters of  $N_{31}$  material used in the 3D thermo-elasto-optical simulations

|  |                                  |
|--|----------------------------------|
| Thermal conductivity, $\kappa$                       | 0.614 W/mK                       |
| Linear thermal expansion coefficient, $\alpha$       | $107 \times 10^{-7}/\text{K}$    |
| Temperature coefficient of refractive index, $dn/dT$ | $-4.3 \times 10^{-6}/\text{K}$   |
| Index of refraction, $n_0$                           | 1.528                            |
| Mass density, $\rho$                                 | $2.83 \times 10^3\text{ kg/m}^3$ |
| Specific heat, $C_p$                                 | $0.75 \times 10^3\text{ J/kgK}$  |
| Elastic modulus, $E$                                 | 64.95 GPa                        |
| Poisson's ratio, $\mu$                               | 0.2735                           |

### 3 实验研究

#### 3.1 实验平台

我们利用了哈特曼波前传感器对三片长的 SSA 进行了热恢复实验研究, 实验装置如图 9 所示。SSA 主要包括以下光学元件: 三片  $N_{31}$  铍玻璃片, 尺寸为  $480\text{ mm} \times 240\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ ; 两侧灯箱各有 6 支掺铈石英管材的氙灯, 内径  $\phi 2.4\text{ cm}$ , 外径  $\phi 2.9\text{ cm}$ , 弧长  $128\text{ cm}$ , 横向抽运; 隔板玻璃为石英材料, 厚度  $4\text{ mm}$ ; 灯箱采用了平板镀银反射器, 片腔内装有上下底板银反射器。哈特曼波前传感器为连续工作方式, 数据采集速率 25 帧/s, 工作波长  $0.6328\text{ }\mu\text{m}$ , 微透镜阵列数为  $17 \times 17$ , 口径  $\phi 60\text{ mm}$ , 经扩束变为  $\phi 200\text{ mm}$ , 与 SSA 相连。哈特曼微透镜点阵图如图 10 所示。哈特曼波前传感器的工作原理是相对测量, 即在记录的一系列波前图中以某一幅波

前 ( $W_m$ ) 为本底, 其他时刻的波前与  $W_m$  完成相减运算后得到所有相对于  $t_0$  时刻的波前变化。在我们的实验中,  $t_0$  时刻是放大器氙灯抽运工作之前的瞬间(放大器处于静态), 因此, 下文给出的实验数据均是相对于  $t_0$  时刻的波前畸变, 即纯粹是由于抽运热效应引起的波前畸变。

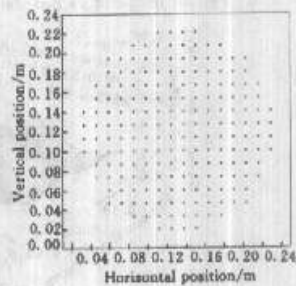


图 10 哈特曼点阵图 ( $16 \times 16$ )

Fig. 10 Picture of Hatamann lens focusing points ( $16 \times 16$ )

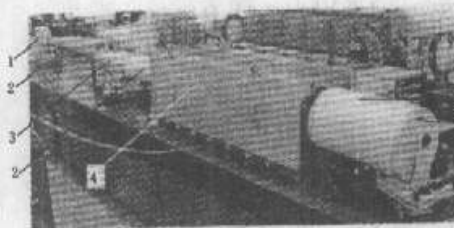


图 9 单口径片状放大器热恢复实验装置

Fig. 9 Experimental setup of thermal recovery of the single-segment amplifier

1: Hatamann wavefront sensor; 2: beam tube; 3: image relay system; 4: three-length single-segment amplifier; 5: reflector

由于 SSA 的铍玻璃片片腔和氙灯灯箱之间的气密性较差, 为氙灯箱提供超纯氮气流进行主动冷却时, 气体很容易进入片腔, 气流扰动对波前测试精度的影响较大。因此, 为了对理论模拟计算结果进行校核, 重点研究了 SSA 的被动冷却过程。为了消除环境气流的扰动, 整个光路置于光束管道之中, 如图 9 所示。另外, 实验均于晚上 19:00 ~ 23:00 进行, 以尽可能消除环境振动的影响。

#### 3.2 实验结果以及与理论模拟的校核

图 11 给出了 SSA 热畸变恢复的波前  $P$ - $V$  值及

RMS 值随时间的变化过程。可以看出,它与理论模拟计算结果符合得比较好(图 8)。图中后半段的  $P-V$  值和 RMS 值略有起伏,这主要是实验环境的影响。在氙灯抽运结束后的初始时刻至热恢复 40 min 左右的时间内,铍玻璃片包边向片框缓慢散热,但由于铍玻璃片包边与片抽运区域之间较大的温差,使得铍玻璃片内发生的主要是自平衡过程;同时,由于氙灯的初始温度较高,它要向隔板玻璃辐射热量,再由隔板玻璃向铍玻璃片辐射传热,这一过程一方面使铍玻璃片的整体平均温度升高(如图 5 所示),另一方面也加速了铍玻璃片内部自平衡过程。因此在前 40 min 内,由铍玻璃片内热梯度引起的波前畸变迅速地恢复;在此后的时间内,整个放大器内部各部件之间的温差较小,与周围环境之间缓慢的热交换过程使得热畸变恢复的速度明显降低。

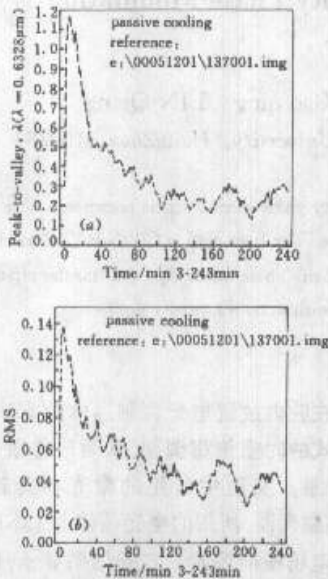


图 11 单口径片状放大器波前畸变的热恢复过程

(a)  $P-V$  值; (b) RMS 值

Fig. 11 Thermal recovery of wavefront distortion of SSA

(a)  $P-V$  value; (b) RMS value

图 12 给出了 SSA 热恢复过程典型时刻的波前图。计算表明,波前热畸变主要由铍玻璃片的热变形以及折射率温度效应引起(热应力对波前的影响远小于前两者,这与文献[2]的研究结果相一致,热应力主要导致光束退偏,这里不再详述),因此片内温度越高的地方,波前越滞后。图 12 与三维理论模拟计算的结果(图 7)基本吻合。图中  $x$  方向的“S”形畸变特征主要由以下两个原因引起:(1) 初始时

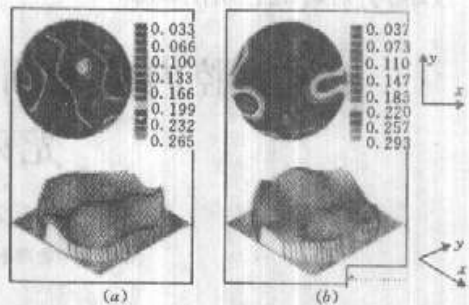


图 12 SSA 热恢复不同时刻的光束波前

Fig. 12 Wavefront at different time during the thermal recovery of SSA

(a) 2.0 h; (b) 4.0 h

刻的氙灯抽运在片高度方向 ( $y$  方向) 比较均匀;(2) SSA 铍玻璃片的宽度 ( $x$  方向) 是其高度的两倍,由于  $N_{11}$  铍玻璃材料的热导系数较小 ( $0.614 \text{ W/mK}$ ),因此,在片内温度梯度充分恢复之前,片内的温度梯度导致片宽度方向的“S”形变形。图 12 中的局部波前起伏主要是由环境影响造成的。

致谢 感谢我院激光技术工程部力一铮同志在 SSA 能源维护、蒋学君同志在 SSA 冷却气路改进以及机械加工与制造研究所张华全同志在 SSA 光束管道制作等方面的工作。

## 参考文献

- 1 D. L. Brown, C. T. Mannell. Thermal analysis of the large close packed amplifiers in the National Ignition Facility (NIF). UCRL-JC-120211, 1995
- 2 S. Sutton, C. Marshall, C. Petty *et al.*. Thermal recovery of NIF amplifiers. *SPIE*, 1997, 3047:560-570
- 3 S. Sutton, A. Erlanson, R. London *et al.*. Thermal recovery of the NIF amplifiers. *SPIE*, 1998, 3492:665-675
- 4 Ph. Arnoux, G. Le Touze, J. P. Caltagirone *et al.*. Thermal recovery of LMJ amplifiers. *SPIE*, 1998, 3492:660-664
- 5 Zhang Hua. Optimization of High Power Nd:glass Laser Amplifiers. Doctor thesis, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1997 (in Chinese)
- 6 Yu Haiwu, Zheng Wanguo, He Shaobo *et al.*. Numerical simulation of thermal recovery of the multi-segment amplifiers. *High Power Laser and Particle Beams (强激光与粒子束)*, 2000, 12(4):411-415 (in Chinese)
- 7 Yu Haiwu, Zheng Wanguo, He Shaobo *et al.*. Modeling of residual thermo-optical distortions of the main amplifier of SG-III prototype. *Chinese J. Lasers (中国激光)*, 2001, A28(4):385-390 (in Chinese)