

文章编号: 0258-7025(2006)03-0311-05

## 用于惯性约束聚变驱动器的 静态相位控制元件

张 锐<sup>1,2</sup>, 张小民<sup>1</sup>, 粟敬钦<sup>1</sup>, 胡东霞<sup>1</sup>, 王文义<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; <sup>2</sup> 中国工程物理研究院北京研究生部, 北京 100088)

**摘要** 焦斑的尺寸和形状主要由光束的波前畸变决定。为了减小大口径激光系统的波前畸变并提高焦斑能量集中度,对静态波前畸变采用了相位板补偿的方法。对于在建中的原型装置,主要考虑补偿主放大系统的波前畸变。根据补偿板摆放位置处的光通量和加工的难易程度,综合考察了四个摆放位置的优缺点,提出用补偿板替代腔镜对波前进行补偿。建立了求解补偿板面形的数值计算模型,就设计时采用的钽玻璃片滤波截止频率做了讨论,得出用  $0.01 \text{ mm}^{-1}$  的截止频率做低通滤波后可以得到最佳补偿效果,给出了补偿板的面形分布和加工方法。模拟结果表明,采用这种方法后静态波前畸变由  $3.35\lambda$  降到  $1.27\lambda$ ; 包含总能量 95% 的衍射极限倍数由  $6.21 T_{DL}$  降到了  $3.95 T_{DL}$ , 说明焦斑能量集中度得到显著提高。

**关键词** 激光技术; 静态相位控制元件; 波前畸变; 相位补偿; 焦斑

**中图分类号** TN 248.1; TL 632+.1 **文献标识码** A

### Static Phase Control Elements for Inertial Confinement Fusion Drivers

ZHANG Rui<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiao-min<sup>1</sup>, SU Jing-qin<sup>1</sup>, HU Dong-xia<sup>1</sup>, Wang Wen-yi<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)  
(<sup>2</sup> Beijing Postgraduate Department, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

**Abstract** Experiments indicate that the size and shape of the final focal spot are mostly dictated by phase noise added to the beam. To diminish the static phase aberrations of large aperture lasers and promote the concentration degree of focal spot, phase corrector plate is proposed. For the technical integration line (TIL) being built in China Academy of Engineering Physics (CAEP), phase aberration of the main amplifier is the largest contributor. Considering peak fluence of the inserting places and the machining process of the phase plate, four potential locations are evaluated, and the cavity mirror is chosen to be the preferred place and is replaced by the phase plate. Numerical calculation model is established to design the corrector plate. Cut-off frequency of the glass-slab filter is discussed and  $0.01 \text{ mm}^{-1}$  is optimally chosen for the lowpass filter. The surface shape and the machining technique of the phase plate are given. Using SG99 light propagation code, simulations demonstrate that the corrector plate can effectively compensate optic finishing errors, and static phase aberration is decreased from  $3.35\lambda$  to  $1.27\lambda$ . Further more, times diffraction limit ( $T_{DL}$ ) containing 95% energy of focal spot is improved from 6.21 to 3.95.

**Key words** laser technique; static phase control elements; wavefront aberration; phase correction; focal spot

## 1 引 言

采用钽玻璃激光系统做惯性约束聚变(ICF)驱动器时,装置中的波前畸变过大将导致聚焦光斑尺寸的增加,影响激光有效注入靶腔<sup>[1,2]</sup>,因此必须对

波前畸变进行严格控制。波前畸变分为动态和静态两大类,在静态波前畸变中,光学元件加工引入的畸变是贡献最大的因素。目前一般采用自适应光学校正畸变波前<sup>[3]</sup>,该方法有两个缺点:一是空间频谱的响应范围有限;二是变形镜控制单元的移动范围和精

收稿日期:2005-08-08; 收到修改稿日期:2005-11-03

基金项目:国家 863 计划(2005AA845030)资助项目。

作者简介:张 锐(1981—),男,内蒙古临河人,中国工程物理研究院激光聚变研究中心硕士研究生,主要从事高功率激光器光束控制研究。E-mail: zrsnowmanzr@hotmail.com

度有限。另外,原型装置光学元件众多且光路复杂,波前畸变累积效应严重,增加了变形镜的制作难度和系统造价,因此有必要寻求其他的波前控制方式。

针对光学元件加工误差属静态的特点,考虑用补偿板校正。国外,美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)的 Wade Williams<sup>[4]</sup>做了相位补偿元件用于国家点火装置(NIF)的数值模拟研究,他将补偿元件放在注入镜前,讨论了放大片更替对波前校正效果的影响。英国核武器研究院(AWE)的 T. H. Bett 等<sup>[5]</sup>设计了补偿 HELEN 激光器静态波前畸变和热畸变的相位控制元件,他们对径向剪切干涉仪测得的波前做 Zernike 多项式拟合,然后对多项式系数求多次平均,由该值得到了补偿元件的面形,但没有补偿效果的实验报道。国内,王智勇等<sup>[6]</sup>做了二元光学相位板修正干涉仪误差的研究,制作了蚀刻二元光学相位板所需的掩模片。曾新

等<sup>[7,8]</sup>提出了一种基于傅里叶基函数展开的大剪切量二维波前重建方案,可以应用于二元光学元件的波面拟合。

由于原型装置具有自身的光路特点,且对波前畸变的抑制有迫切的要求,因此我们开展了补偿板在该装置中的应用研究。

## 2 相位补偿元件摆放位置的选择

低频波前畸变是决定焦斑主瓣的主要因素,由于它具有较大的非涅耳数,衍射效应弱,在光束传输过程中,相位保持稳定<sup>[9]</sup>,而中高频波前畸变会在传输中发生变化,因此对低频波前畸变的补偿才是有意义的。理论上补偿板可以放在光路中的任何位置,图 1 以原型装置<sup>[10]</sup>为例给出了补偿板的四处典型摆放位置。

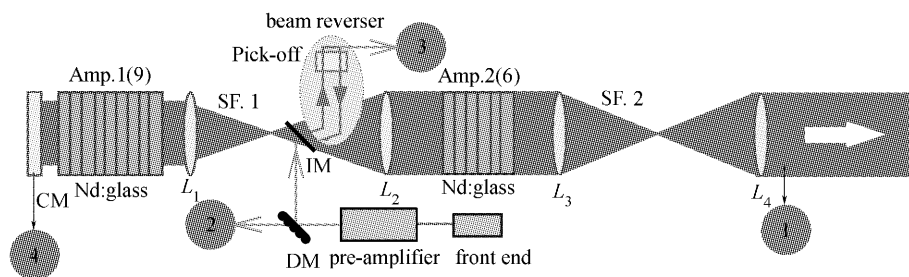


图 1 相位补偿板在原型装置中的典型摆放位置

Fig. 1 Typical locations of the phase corrector plate in the prototype facility

由于预放输出为 2~3 倍衍射极限光,相对于主放大系统带来的波前畸变是个小量,因此可以主要考虑补偿主放大系统带来的波前畸变。主放光路从预放的末级整形光阑(光束口径 7 cm×7 cm)开始,经空间滤波器进入 Amp. 1 做前两程放大(20 cm×20 cm),然后通过 Pick-off 镜进入 U 型光束反转器,再进入 Amp. 1 做三四程放大(24 cm×24 cm)。接着进入助推放大器 Amp. 2 (27 cm×27 cm),最后通过传输滤波器 SF. 2 输出(29 cm×29 cm)。

图 2 给出了原型装置各位置处光学元件的损伤阈值要求,用来评估补偿板损伤的风险。

补偿板四个摆放位置特性的比较:

1) 加在传输空间滤波器的输出端。该位置需要的补偿板口径最大,也是系统波前累加的最后位置,波前补偿量大,成本较高;该处损伤阈值要求最高(见图 2OUT 处);同时补偿板加工时引入的高频噪声在高强度光传输下可能因为非线性增长破坏后

续光路中的光学元件;

2) 加在主放大器注入光路中。由于光束单次通过,为补偿系统波前畸变,元件表面相位梯度大,不利于加工;补偿板引入的波前畸变会造成脉冲经过 SF. 1 一程小孔时,由于焦斑过大而使过孔效率急剧下降,降低能量传输效率;

3) 加在光束反转器中。由于光束已经过两程放大且光束口径最小,此时对元件的损伤阈值要求很高(见图 2PEPC 处);光束单次通过此处,补偿量和相位梯度都较大;

4) 加在腔镜处。这是最具优越性的一种方案,因为:光束两次经过该位置,且补偿板以反射式工作,因此加工时的刻蚀深度最小;此处光束口径居中,相位梯度较小,容易加工;该位置处元件损伤阈值要求较低(见图 2CM 处)。

通过比较,最终选择用补偿板替代腔镜对波前进行补偿。

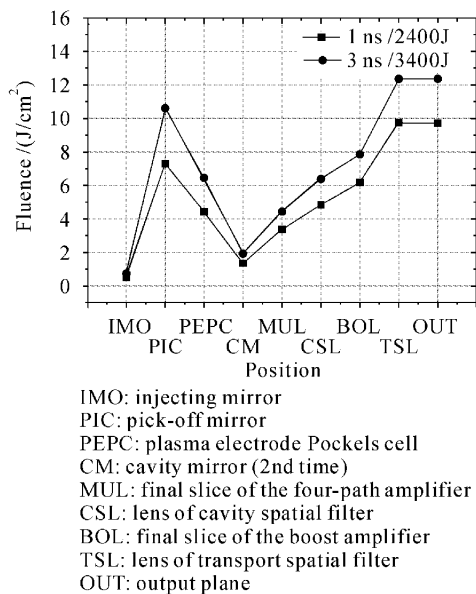


图 2 1 ns 和 3 ns 下原型装置各位置处光学元件的损伤阈值要求

Fig. 2 Damage threshold requirements of technical integration line optics with pulse width 1 ns and 3 ns

### 3 相位补偿元件的设计

由于光束传输过程中存在变口径和横截面旋转  $90^\circ$  等影响因素,因此补偿板的面形没有数学精确解。为了在腔镜处对四程放大和助推放大产生的相位畸变做有效补偿,提出了求解补偿板面形的方法,如图 3 所示。

1) 注入不加波前畸变的光束,在腔镜各像传递面处记录各段放大片带来的相位畸变;

2) 以加入补偿板后系统剩余波前畸变 PV 值小于小量  $\epsilon$  为判据,通过迭代得到腔镜处的补偿板相位。图 3 给出了采用的流程图。

在设计补偿板时,对钕玻璃片的检测波前做了截止频率为  $f_{\text{cut}}$  的低通滤波,并在表 1 中比较了不同  $f_{\text{cut}}$  下补偿板的波前校正效果。其中  $T_{\text{DL}}$  代表衍射极限(DL)倍数, $\lambda$  为 1053 nm,  $G_{\text{RMS}}$  为波前梯度的均方根(RMS)值。表中还给出了不对片子滤波的补偿效果和不加补偿板时的光束参数,用以说明对片子滤波的重要性。

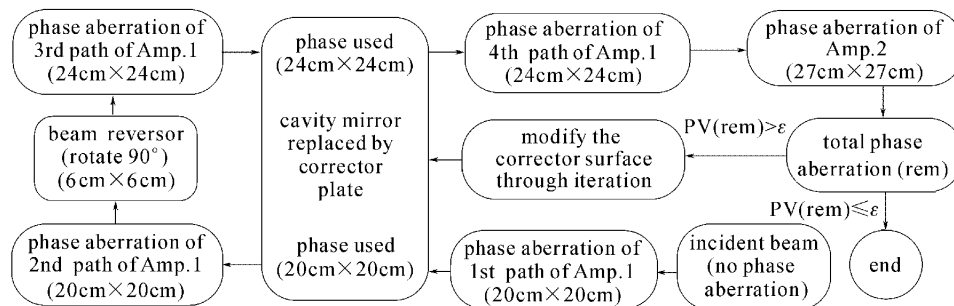


图 3 设计时采用的流程图

Fig. 3 Flow chart of phase corrector plate design

表 1 钕玻璃片低通滤波截止频率的选取

Table 1 Choosing of the cut-off frequency of the lowpass filter of the Nd: glass slab

$f_{\text{cut}} / \text{mm}^{-1}$	1/200	1/150	1/125	1/100	1/75	1/50	1/20	1/10	Without filtering	Without corrector
PV / $\lambda$	2.28	2.01	1.44	1.27	1.23	1.33	1.46	1.48	1.72	3.35
$G_{\text{RMS}} / (\lambda / \text{cm})$	0.099	0.089	0.070	0.064	0.065	0.068	0.075	0.085	0.094	0.134
$T_{\text{DL}} (95\% \text{ energy})$	4.99	4.60	4.17	3.95	4.13	4.19	4.57	5.58	5.90	6.21

对于这组钕玻璃片数据,减小滤波截止频率时,  $G_{\text{RMS}}$  值与包含 95% 能量的衍射极限倍数的变化规律一致,都是先减小后增大。这是因为,采用较高的滤波截止频率或不滤波时,高频波前畸变在传输过程中由于衍射发生了较大改变,使设计出的补偿板不能满意地对波前进行补偿;而采用较低的滤波截止频率时,片子波前的边缘部分在滤波后与原来的

面形有了较大差异,致使得到的补偿效果变差。由于最关心的是对聚焦能量集中度的改善,因此选用  $0.01 \text{ mm}^{-1}$  作为钕玻璃片低通滤波的截止频率,下面的计算结果都是在这种条件下得到的。

图 4(a) 给出了通过多次迭代得到的补偿板面形,图 4(b) 为迭代得到的系统剩余波前畸变(图 3 中的 rem)。可以看出,该剩余波前畸变很小,说明

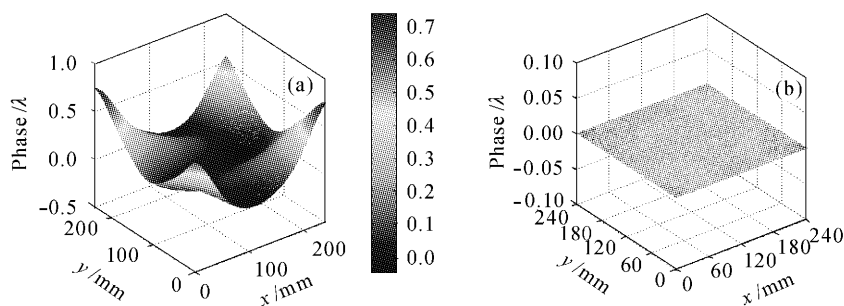


图4 替代腔镜的补偿板相位分布(a)和多次迭代后的系统剩余波前畸变(b)

Fig. 4 Phase profile of the cavity mirror replaced by corrector plate (a) and the calculated residual phase aberration of the system (b)

迭代后得到了稳定的面形。

补偿板的制作方法分为间接写入和直接写入两大类<sup>[5]</sup>,间接写入又可分为台阶型和连续型。多台阶结构加工环节多、周期长且对准精度要求高;连续型元件采用可变曝光剂量的激光束<sup>[11]</sup>或电子束对涂在基片表面的抗蚀材料曝光,然后用刻蚀方法将抗蚀剂表面结构转移到基片上;也可以采用变灰阶掩模技术对入射光强调制,从而将面形转移到光刻胶上,但这种方法对掩模的质量和光刻胶的均匀性要求很高。相对来说,采用湿法刻蚀的直接写入技术有更大的优越性,该方法利用表面张力梯度效应(Marangoni效应)控制喷射到基底表面的化学腐蚀液,采用了反馈回路控制加工过程,干涉仪和校正

算法可以对过程进行实时控制从而减小加工误差,M. C. Rushford等<sup>[12]</sup>用这种方法为英国核武器研究院的HELEN激光器制作了相位补偿板。

#### 4 模拟结果

用SG99光传输程序对补偿效果进行了验证,按照实际光路排布,考虑衍射效应并代入未滤波的铍玻璃片波前数据计算。静态条件下,注入光脉冲的空间包络选择接近实验近场强度分布的八阶超高斯型。为单独考虑主放大器引入的波前畸变,模拟时主放大器注入光波前取为零。图5比较了有无补偿板时主放大器输出光的波前,波前取出位置选在SF.2后腔镜的像传递面上。

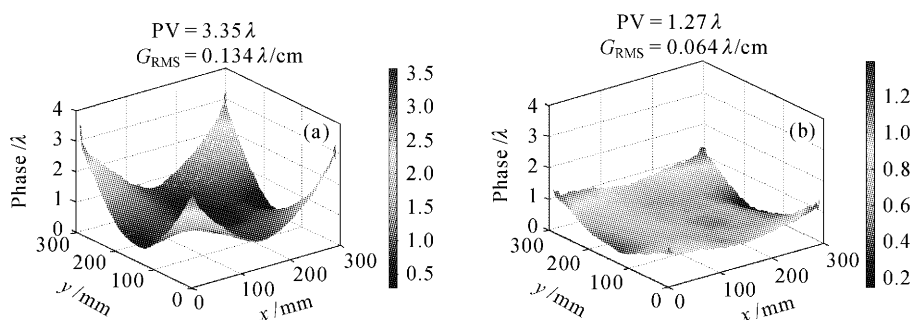


图5 不加相位补偿板(a)和加相位补偿板(b)时的主放大器输出光波前

Fig. 5 Output phase of the main amplifier without phase corrector plate (a) and with phase corrector plate (b)

波前PV值和 $G_{RMS}$ 值在补偿后都有了显著降低,说明波前畸变减小,主放大器输出光束质量得到改善。图4(b)和图5(b)存在差异的原因是,前者计算时为减弱衍射效应对补偿板设计带来的影响,对放大片波前数据采用了 $0.01\text{ mm}^{-1}$ 的低通滤波;而后者计算时为得到实际情况下的输出波前,代入的是未做滤波处理的波前数据。

图6比较了补偿前后焦斑的能流密度分布,透镜焦距为220 cm。由图6可以看出,补偿后焦斑的峰值能流密度得到很大增强,焦斑形态得到改善。

图7给出了焦斑能量百分比随衍射极限倍数变化的曲线。补偿后包含焦斑总能量95%的衍射极限倍数由6.21下降到3.95,说明焦斑能量集中度得到显著提高。

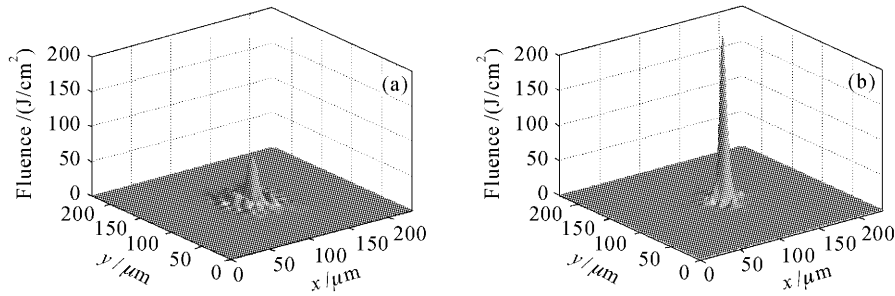


图 6 焦斑能流密度分布的比较

(a) 不加相位补偿板; (b) 加相位补偿板

Fig. 6 Comparison of fluence in the far field

(a) without phase corrector plate; (b) with phase corrector plate

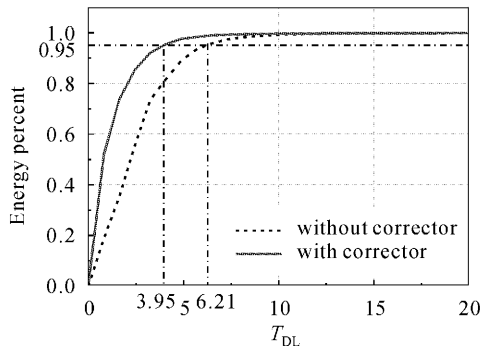


图 7 焦斑能量百分比随衍射极限倍数变化的曲线

Fig. 7 Energy percent as a function of times of the diffraction limit ( $T_{DL}$ )

## 5 结 论

对于高功率固体激光驱动器,设计相位补偿元件时,首先要评价补偿板在装置各处摆放的优缺点,选择最佳的插入位置。由于衍射效应,对低频波前畸变的补偿才具有可操作性,而铍玻璃片不同滤波截止频率设计出的补偿板补偿效果也是不同的,对这种影响因素进行了细致的研究。对于原型装置提出用补偿板替代腔镜的方法,模拟计算表明,该方法能显著改善主放大器输出光束质量,提高远场能量集中度。这种静态波前补偿技术对降低自适应光学系统的设计制作要求,抑制多程放大系统的大幅低频波前畸变具有重要的现实意义。进一步深入研究这种技术时,可以考虑用补偿板对放大片热畸变和系统像散进行补偿。目前,正积极着手这种技术的实验研究。

## 参 考 文 献

- 1 M. L. Spaeth, K. R. Manes, C. C. Widmayer *et al.*. The National Ignition Facility wavefront requirements and optical architecture [C]. *SPIE*, 2004, **5341**:25~42
- 2 Su Jingqin, Wei Xiaofeng, Ma Chi *et al.*. Simulation on the model of low frequency distorted wavefront of laser beam [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(s1):163~166
- 3 粟敬钦,魏晓峰,马 驰 等. 激光束低频畸变波前模型的计算模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(增刊):163~166
- 4 R. A. Zacharias, N. R. Beer, E. S. Bliss *et al.*. National Ignition Facility alignment and wavefront control [C]. *SPIE*, 2004, **5341**:168~179
- 5 Wade Williams. Simulations of a phase corrector plate for the National Ignition Facility [C]. *SPIE*, 1999, **3492**:355~362
- 6 T. H. Bett, A. R. Barnes, N. W. Hopps *et al.*. Development of static phase control elements for high power solid state lasers [C]. *SPIE*, 2001, **4440**:93~100
- 7 Wang Zhiyong, Xu Min, Jiang Tieliang *et al.*. Using binary optical phase plate to correct the error of interferometer [J]. *Optronics · Lasers*, 1995, **6**(6):369~375
- 8 王智勇,徐 敏,江铁良 等. 二元光学相位板修正干涉仪误差[J]. *光电子·激光*, 1995, **6**(6):369~375
- 9 Zeng Xin, Liang Peiying, Ding Jianping. Two-dimensional wavefront reconstruction of shearing interferograms with big shears [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6):782~786
- 10 曾 新,梁佩莹,丁剑平. 大剪切量干涉的二维波前重建[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6):782~786
- 11 Zeng Xin, Ding Jianping, Liang Peiying *et al.*. Wave front reconstruction from shearing interferograms using least square fitting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3):335~340
- 12 曾 新,丁剑平,梁佩莹 等. 二维剪切干涉波前的最小二乘法重建[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3):335~340
- 13 Yongkang Guo, Fuhua Gao, Yangsu Zeng *et al.*. Using a phase corrector plate to correct static phase aberrations in high power laser system [C]. *SPIE*, 2002, **4924**:259~264
- 14 Xiaomin Zhang, Feng Jing, Zhan Shui *et al.*. Preliminary design of Technical Integration Line (TIL) for SG-III laser facility [C]. *SPIE*, 1999, **3492**:877~883
- 15 Xiaohui Sun, Changhe Zhou, Huayi Ru *et al.*. Laser writing system for fabrication of diffractive optics elements [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(1):4~6
- 16 M. C. Rushford, J. A. Britten, C. R. Hoaglan *et al.*. Wet-etch figuring: optical surfacing by controlled application of etchant solution using the Marangoni effect [C]. *SPIE*, 2001, **4451**:249~258