

文章编号: 0253-2239(2003)10-1225-5

# 高功率固体激光放大系统相位自校正方法研究\*

邓青华 张小民 景峰

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

**摘要:** 就光学元件间低频相位误差叠加提出用相关系数作为叠加相位结果的估计参量,并通过模拟计算和验证实验证明了相关系数能有效地对低频相位叠加结果进行比较估计,在此基础上就高功率固体激光放大系统中放大片的选取和安装提出了自校正方法并实现了自校正过程。

**关键词:** 高功率激光; 相关系数; 自校正方法; 相位校正

中图分类号: TN241 文献标识码: A

## 1 引 言

在大多数惯性约束聚变激光驱动器中,均采用多级叠片放大器作主放大器,而放大片以布儒斯特角斜放于光路中。光束来回数次经过这些放大片,它们是光束静态相位误差的主要来源,而这些静态相位误差的引入将影响光束的传输、倍频器的转换效率直至光束的聚焦焦斑质量,因此要想办法使这些放大片给光束带来的相位误差减小到最小。在大型激光系统中,光路多,各光路中使用的放大片也多。为了使各光路中放大片所引入的相位误差最小,应该合理地排布这些放大片。本文就放大片的选取和排布提出自校正概念。

自校正是将现有的放大片等光学元件合理排布,使它们自身产生的相位畸变能够最大可能地相互校正,从而给光束带来最小的相位误差。由于放大片的加工工艺相同,放大片引入的相位误差有相似的特征,所以它们之间有相位误差相互校正的可能;而且在大型激光系统中,放大片数量众多,也有利于将放大片合理搭配实现自校正。

自校正概念的提出是很有意义的。大幅度的相位畸变会增大自适应光学等相位校正系统的校正难度<sup>[1]</sup>,增加校正系统的复杂性,从而增加系统投资。自校正方法可以对各光路放大片的选取和排布进行量化控制,使各光路放大片引入的相位误差达最小值,从而可降低对相位校正系统的要求,降低系统造价;况且,自校正能有效地使放大片间相互进行相位

校正,可适当降低光学元件的加工要求,这样也能减少系统投入。

## 2 低频相位叠加模拟研究

一般认为系统中光学元件引入的波前畸变分为相干误差和非相干误差两大类。激光束多次往返通过同一个光学元件,引入的总静态波前畸变是相干叠加的,其值等于这个光学元件的畸变量与通过次数的乘积;激光束一次通过多个光学元件,引入的总静态相位畸变是非相干叠加的,叠加结果等于各个光学元件畸变量的均方根值。所以系统中的低频相位误差满足平方和的根叠加规律<sup>[2]</sup>,即

$$\Delta W = \sqrt{\sum_{i=1}^N (t_i \cdot \Delta W_i)^2}, \quad (1)$$

式中  $\Delta W$  是系统光学元件引入的波前误差, $N$  为光学元件总数, $\Delta W_i$  是各光学元件的透射波前畸变, $t_i$  是光束通过第  $i$  个光学元件的次数。

但激光放大系统中的放大片由于所用材料和加工工艺相同,所以它们引入的相位误差相似,这些放大片的相位误差叠加结果是否能用平方和的根规律有效计算值得进一步研究,下面就从两个方面对低频相位误差叠加进行模拟分析。

### 2.1 不同相位片间的相位叠加

首先就不同放大片低频相位分布间的叠加结果进行模拟研究。表 1 所列的就是模拟所得的 8 张放大片相位分布<sup>[3]</sup>的参量,文中的 P-V 值是指相位分布的峰谷值。

由表 1 可知:以上各相位片的均方根相位梯度值<sup>[4]</sup>均为 8 nm/cm,那么依据平方和的根叠加规律,单色平面光经过相位片 sp1 和其他任一相位屏后

\* 国家 863 惯性约束聚变领域资助课题。

E-mail: ajdqh@sohu.com

收稿日期:2002-06-27;收到修改稿日期:2002-12-05

的均方根梯度都将是  $8\sqrt{2}$ , 即 11.31, 然而模拟叠加结果有起伏, 而且有规律。

Table 1 The parameters of the simulating amplifiers' phase

Phase plate	RMS phase gradient / (nm/cm)	P-V / $\lambda$
sp1	8	0.4334
sp2	8	0.3716
sp3	8	0.3597
sp4	8	0.3711
sp5	8	0.3745
sp6	8	0.3599
sp7	8	0.3289
sp8	8	0.4331

将其余相位片分别与相位片 sp1 放入图 1 所示的模拟光路中进行光传输计算, 模拟光路分别编号为 1、2、...、7。入射光源是单色平面波, 对观察屏上所得到的相位分布求均方根相位梯度值和 P-V 值, 所得结果分别如图 2 和图 3 所示。

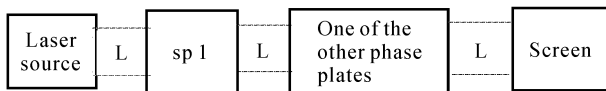


Fig. 1 Simulating beamline

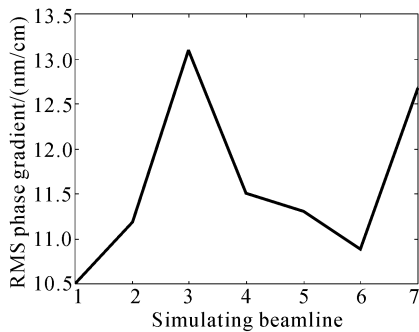


Fig. 2 The RMS phase gradient of simulation

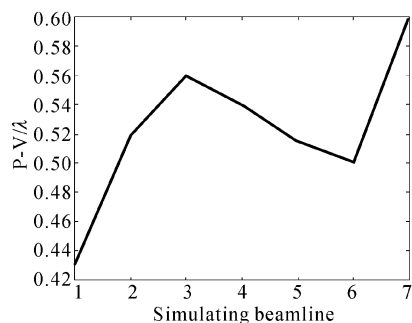


Fig. 3 The P-V value of simulation

由图 2 和图 3 可以看出: 均方根相位梯度和 P-V 值的涨落趋势大体相同。再分别求出 sp1 与其余 7 片相位片的相关系数, 两同维数矩阵的相关系数用(2)式来求解:

$$f_{xg} = \frac{\sum_{i,j} [\text{ph1}(x_i, y_i) - \overline{\text{ph1}}][\text{ph2}(x_i, y_i) - \overline{\text{ph2}}]}{\sqrt{\sum_{i,j} [\text{ph1}(x_i, y_i) - \overline{\text{ph1}}]^2 \sum_{i,j} [\text{ph2}(x_i, y_i) - \overline{\text{ph2}}]^2}}, \quad (2)$$

各模拟光路两相位屏的相关系数示于图 4。

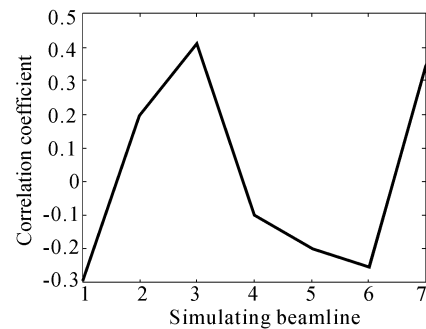


Fig. 4 The correlation coefficient of sp1 and other phase plates

比较图 4 和图 2、图 3 可知: 相关系数的涨落情况与均方根相位梯度的涨落几乎相同, 相关系数的涨落趋势与 P-V 值的涨落也大体相同。由此可以看出: 低频相位误差的叠加与相位片之间的相关系数是有关的, 且相关系数越小, 叠加所得的相位误差越小, 相关系数越大, 叠加所得的相位误差越大。

## 2.2 同一相位片不同安装方式下对相位叠加结果的影响

对于矩形的放大片, 从光束传输方向看, 有四种安装方式, 如图 5 所示(为了看清楚放置位置, 用 1、2、3、4 对四个角进行了标记)。

将一放大片四种放置方式下的相位分布和另一固定相位分布 sp1 放入图 1 所示光路进行传输模拟计算, 得到表 2 所示的结果。

Table 2 The addition result of a amplifier in different fixing method and another fixed amplifier

Beamline	RMS phase gradient / (nm/cm)	P-V / $\lambda$	Correlation coefficient
sp1 a	19.49935	0.7669	0.2528
sp1 b	18.99991	0.7574	0.2019
sp1 c	18.03593	0.6409	-0.1076
sp1 d	17.62431	0.5210	-0.1489

从表 2 可以看出：sp1 与 a、b、c、d 四种安装方式下相位分布的相关系数依次减小，而叠加相位的均方根相位梯度和 P-V 值也依次减小。以上这些数据结果不但表明了放大片在不同安装状态下对光

束的相位有不同的影响，而且进一步说明了放大片间相位叠加后的畸变量随着相关系数的增大而增大。

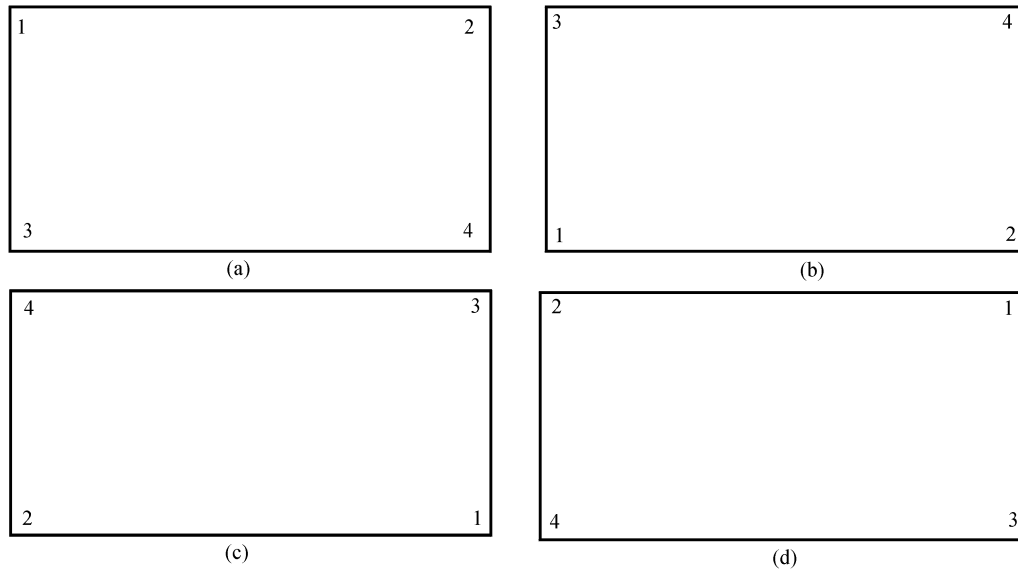


Fig. 5 Four laying methods of an amplifier

以上两方面的模拟计算都表明了低频相位叠加与相互间相关系数有关，相关系数越大叠加后的相位畸变量越大，相关系数越小叠加后的相位畸变量越小。本文就以相位分布间的相关系数为量化指标而对高功率固体激光装置中放大片的合理选取和安装提出了相位自校正概念。

的相位分布(测量光波长为  $0.6328\mu\text{m}$ ，测量光路示于图 7)，叠加后相位分布如图 8 所示，并就所测叠加相位进行分析，分析结果见于表 4。

Table 3 Parameters of glasses used for experiment

Nd:glass slab	p001	p002	p003
P-V / ( $\lambda$ )	0.1225	1.1297	0.6796

### 3 自校正方法的实验验证

下面是一个对自校正方法的可信度进行进一步验证的实验。实验用的三块 K9 玻璃片的相位分布<sup>[4,5]</sup>见图 6(为方便计将三块玻璃片分别编号为 p001、p002、p003)，三块玻璃片的相位参量见表 3。将三块玻璃片两两组合，然后分别测量他们叠加后

Table 4 Addition results of every two glasses

Adding glasses	p001 p002	p001 p003	p002 p003
Adding P-V / ( $\lambda$ )	1.0380	0.6591	1.6943
Correlation coefficient of the two glasses	-0.7135	-0.6204	0.9787

结合表 3 和表 4 可知：当 p001 和 p002、p003 组合叠加时，p001 对 p002、p003 起到了相位补偿的作

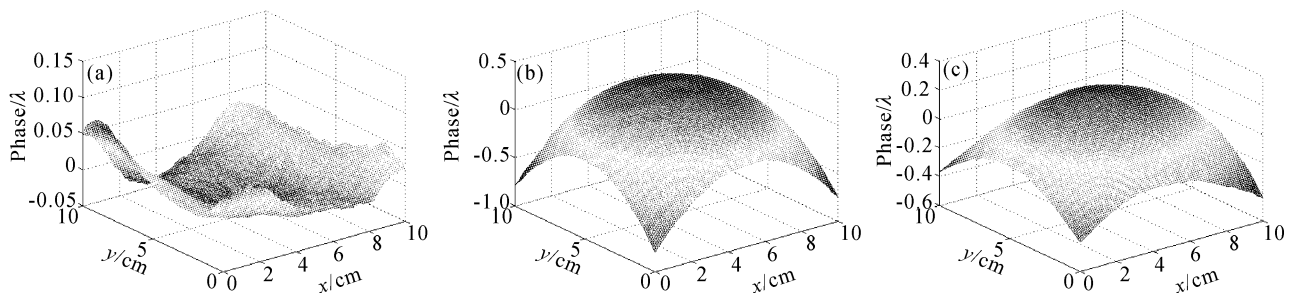


Fig. 6 Transmitting wavefronts of experiment glasses

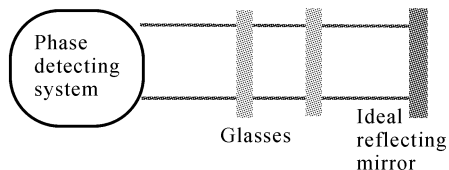


Fig. 7 Measuring beamline of phase addition

用,这可以从叠加后的两相位 P-V 值比 p002、p003 自身相位分布的 P-V 值小看出,而 p001 相位分布和 p002、p003 两相位分布的相关系数小于 0;p001 对 p002 的补偿效果好于 p001 对 p003 的补偿效果,

这可以从补偿后相位分布的 P-V 值与校正前的 P-V 值的差值看出来;p002 和 p003 组合时,叠加后相位分布的 P-V 值几乎接近两相位分布的 P-V 值直接相加,p002 和 p003 两相位分布之间的相关系数为 0.9787 能说明这个结果。由此可以得出结论:当两个片相位分布的相关系数是小于 0 的,这两个片的相位能相互补偿,且相关系数越小,相互补偿的效果也越好;而当两相位分布的相关系数大于 0 时,两相位分布叠加后的结果是增大了畸变,且相关系数越大,增大的趋势愈强。这个实验证明了本文所提出来的自校正方法的可信性和可行性。

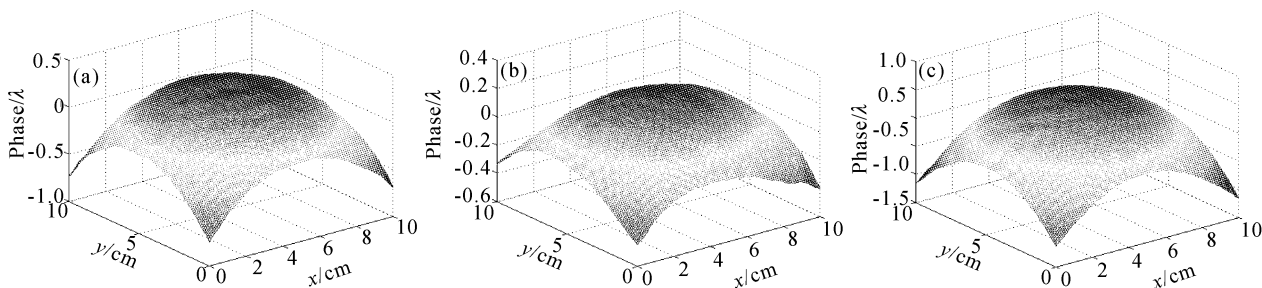


Fig. 8 The adding transmitting wavefronts of each two of these plates

#### 4 自校正过程的实现

实际系统中放大片是以布儒斯特角置于光路中的,而对放大片透射波前进行测量时是将放大片以布儒斯特角放入光路中的,所以可在模拟计算时将以布儒斯特角放置的放大片等效为垂直于光束传播方向放置。图 9 就是将实际传输光路简化成等效光路的示意图。

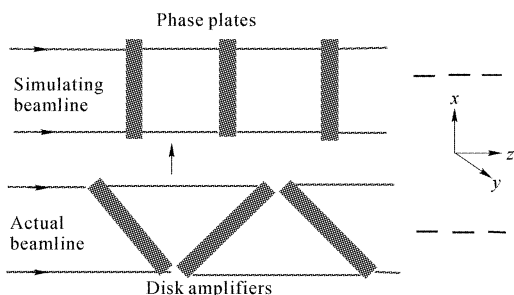


Fig. 9 Simplified beamline

自校正方法是为了合理地选取和排布放大片,

从而使多程放大系统给光束带来最小的静态相位畸变而提出来的,下面介绍实现自校正过程的模型:

- 1) 测量各放大片的相位分布。对放大片进行相位分布测量时应将放大片以布儒斯特角放入光路,并对放大片此时的放置方式进行标记及记录(这是为了确定放大片最后在光路中的摆放方式);
- 2) 求各相位分布的 P-V 值,并将 P-V 值最大的放大片挑选出来,将其作为第一个放大器的第一片放大片;
- 3) 将剩余放大片在另外三种安装方式下的相位分布求出;
- 4) 将剩余放大片四种安装方式下的相位分布与已选出的第一张放大片的相位分布求相关系数,将相关系数最小的放大片及它的安装方式找到,这片放大片就作为第一个放大器的第二片放大片,并将安装方式记下;
- 5) 将已选出两片放大片的相位分布放入图 10 所示的模拟光路中进行传输计算,以平顶平面波作

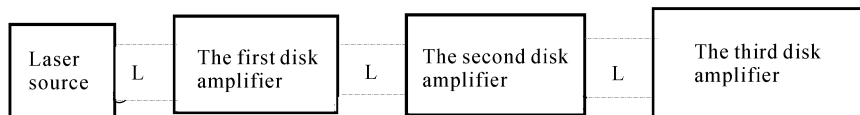


Fig. 10 Calculating beamline

为入射光, 求出第三片放大片处的光束相位分布。模拟光路中的参量, 如  $L$ , 从实际光路中得到;

6) 求出剩余各放大片四种安装方式下相位分布与上一步中求得的相位分布的相关系数, 将相关系数最小的放大片及它的安装方式找到, 这片放大片就作为第一个放大器的第三片放大片, 并将安装方式记下;

7) 重复以上 5)、6) 两步, 依次找到第一个放大器中的其它放大片;

8) 在余下的放大片中重复步骤 2)~7), 找到其它放大器所需的放大片。

### 参 考 文 献

- 1 Zeng Zige, Ling Ning, Jiang Wenhan. Research on the capability of simulating wavefront of motive reflecting mirror for ICF focal spot controlling. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1998, **10**(1):1~5 (in Chinese)
- 2 Su Jingqin, Wei Xiaofeng, Ma Chi *et al.*. Simulation on low-frequency aberration of laser beams. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), **12**(S1):163~166 (in Chinese)
- 3 Deng Qinghua, Zhang Xiaomin, Jing Feng *et al.*. Research on length scale of low-frequency phase aberration. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 2002, **14**(4):508~510
- 4 Rao Changhui, Shen Feng, Jiang Wenhan. Analysis of closed-loop wave front residual error of adaptive optical system using the method of power spectrum. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(1):68~73 (in Chinese)
- 5 Liu Lanqin, Wu Yi. Features of G-S method for measuring wavefront distortion. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(9):1259~1262 (in Chinese)

1 Zeng Zige, Ling Ning, Jiang Wenhan. Research on the capability of simulating wavefront of motive reflecting

## Phase Self-Correcting Method for High-Power Laser Amplifiers

Deng Qinghua Zhang Xiaomin Jing Feng

(Laser Fusion Research Center, The Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900)

(Received 27 June 2002; revised 5 December 2002)

**Abstract:** The correlation coefficient of two wavefronts is proposed to describe and estimate the adding result of low-frequency phase aberration. Both the simulation and the experiment of low-frequency phase error adding propagation prove that the correction coefficient can efficiently be used to estimate the result of phase addition. Based on the result, a new kind of phase correcting method — phase self-correcting method is put forward, to properly choose and set the disk amplifiers in the high-power solid-state laser facility. The model to carry out the self-correcting method in high-power laser system is given.

**Key words:** high-power laser; correlation coefficient; phase self-correcting method; phase correcting