

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0152-05

# 高功率固体激光系统光束波前畸变特性分析

赵军普 胡东霞 代万俊 周 维 张 鑫 张 崑 蒋学君 邓 武

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 分析了目前钕玻璃片、大口径反射镜和晶体等光学元件的波前特征,同时对多路激光系统的静态波前和动态波前热畸变特征进行了统计分析。结果发现,同类元件的波前特征具有很大的相似性,因此不同路激光系统的静态波前特征也比较相似,主放大系统静态波前以像散为主,波前畸变峰谷值(PV)在  $2\lambda \sim 3\lambda$  ( $\lambda$  为 1053 nm) 之间,在采用  $90^\circ$  旋转反转器的多程放大激光系统中,主放大系统动态波前畸变以离焦为主,PV 值在  $4\lambda \sim 5\lambda$  之间,扣除离焦后,动态波前畸变 PV 值在  $1\lambda \sim 2\lambda$ , 全系统最大波前畸变 PV 值可能超过  $6\lambda$ 。

**关键词** 激光器; 固体激光; 波前; 静态畸变; 动态畸变; 光束质量

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201037s1.0152

## Wavefront Characters of High Power Solid-State Lasers

Zhao Junpu Hu Dongxia Dai Wanjun Zhou Wei Zhang Xin

Zhang Kun Jiang Xuejun Deng Wu

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** In this paper, the wavefront properties of large aperture optics such as neodymium glass, reflecting mirrors and crystals have been systematically studied. Static and dynamic wavefront aberration of multi-beams laser system have been statistically analyzed. The results show that one kind of optics have similar wavefront properties, and different laser beams also have similar characteristics on static wavefront aberration. The chief static aberration of main amplifier is astigmatism with the PV value about  $2\lambda \sim 3\lambda$  ( $\lambda = 1053 \text{ nm}$ ), and in  $90^\circ$  rotation reversal multi-pass amplifier laser system, the chief dynamic aberration of main amplifier is defocus with the PV value about  $4\lambda \sim 5\lambda$ . After excluding defocus, the dynamic wavefront aberration PV value is about  $1\lambda \sim 2\lambda$ , and maximum aberration of the whole laser system is likely to exceed  $6\lambda$ .

**Key words** lasers; solid-state lasers; wavefront; static distortion; dynamic distortion; beam quality

## 1 引 言

在高功率固体激光驱动器中,光束波前质量是表征激光系统性能的重要参数,其主要原因是,首先激光驱动器对光束的远场强度分布有着非常严格的要求,而波前是决定光束远场强度分布的重要因素<sup>[1]</sup>,其次由于短波长激光的束靶耦合效率高,在高功率激光系统的终端通常需要使用晶体把激光波长从近红外的基频(1053 nm)转换到近紫外的三倍频(351 nm),而光束波前畸变影响谐波转换效率<sup>[2]</sup>,最后氙灯抽运的片状放大器激光系统中,钕玻璃在氙

灯辐照下会产生不均匀的温升,由此带来的动态波前畸变必须在恢复后才能进行下一次的大能量发射,制约装置的运行效率<sup>[3]</sup>。此外小尺度的波前相位噪声,在高功率激光系统中还会由于非线性增长产生小尺度自聚焦和热像等非线性效应,从而使光束近场强度调制加剧,制约装置的输出能力<sup>[4]</sup>。因此对高功率固体激光系统中的光束波前畸变特征进行研究,对制定相应的控制措施具有重要的实际意义。

本文分析了激光系统构型、光学设计、光学元件和氙灯抽运等因素对光束波前畸变的影响,对大口

收稿日期: 2010-01-15; 收到修改稿日期: 2010-04-21

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金(2009B0401045)资助课题。

作者简介: 赵军普(1980—),男,硕士,助理研究员,主要从事强激光传输和光束质量控制技术方面的研究。

E-mail: scu junpu@126.com

径相移干涉仪检测的光学元件波前数据和哈特曼波前传感器实验测量的光束波前数据进行了分析。

## 2 光学元件的波前畸变特征分析

### 2.1 高功率固体激光系统简介

图 1 为高功率固体激光装置 TIL (Technical Integration Experiment Line) 的单束光路示意图, 从光束波前分析的角度, 主光路可划分为前端预放、主放大系统、光束编组站和终端光学组件四部分。前端预放包括以光纤为主要介质的前端系统和

以小口径光学元件为主的预放系统两部分, 输出 1053 nm 焦耳量级的纳秒激光脉冲, 为主放大系统提供种子光源。主放大系统包括空间滤波器、片状放大器和光束反转器三部分, 主要由大口径长焦透镜、大口径钼玻璃片等透射光学元件和一些小口径的反射光学元件组成, 由氙灯抽运钼玻璃片, 使得主放大级的输出能量达到千焦耳量级, 光束编组站主要由大口径传输反射镜 TM 组成, 终端光学组件主要由 KDP 晶体、打靶透镜和衍射光学元件 (如光束取样光栅 BSG) 等构成。

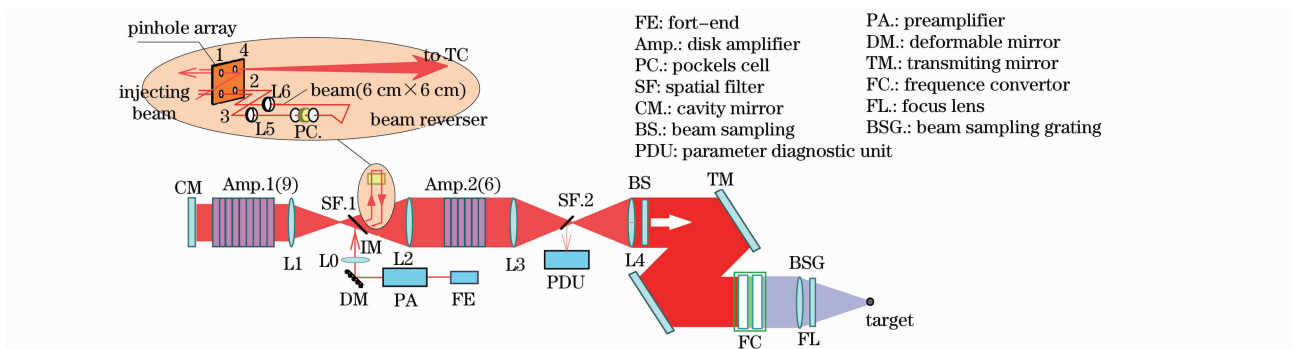


图 1 高功率固体激光系统光路示意图

Fig. 1 Schematic of the optical configuration of high-power solid-state laser system

### 2.2 不同种类的光学元件波前畸变特征

预放系统的光学元件尺寸相对较小, 容易获得较好的波前质量, 测试结果表明, 目前 TIL 预放系统输出波前峰谷值 (PV) 值约为  $1\lambda$ 。主放大系统的大口径光学元件尺寸超过 300 mm, 获得好的波前质量相对比较困难, 并且在对系统进行光学设计时, 为了实现多程放大的目的, 空间滤波器透镜采用离轴方式, 同时为了阻止鬼光束沿主光轴传输, 透镜需要倾斜安装<sup>[5,6]</sup>, 透镜的这种使用方式产生的主要像差类型是像散。钼玻璃片在主放大级中是数量最多的元件, 而且光束在放大器 Amp. 1 中四次通过增加了钼玻璃的等效片数, 为了使放大器的透射波前得到控制, 在放大器安装前可以对钼玻璃片的排布次序和安装姿态进行优化选配, 使其波前畸变得一定程度上的自补偿<sup>[7]</sup>。光束编组站的大口径反射镜引入的波前畸变一方面来自元件面形的加工质量, 另一方面和装夹应力密切相关, 装夹应力会在元件使用过程中发生变化, 是系统波前不稳定性的来源之一。终端光学组件内晶体加工采用的是金刚石车床切削工艺, 光束取样光栅 (BSG) 采用的是离子刻蚀工艺, 这两种工艺和其他元件采用的抛光工艺存在比较大的差别, 因此元件的波前特征就可能和

其他元件不同。以下就钼玻璃片, 传输反射镜, KDP 晶体和光束取样光栅四类大口径光学元件的波前特征进行分析, 波前由大口径相移干涉仪检测, 检测波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , 这里对于光学元件的检测结果中波长均指检测波长。

图 2(a), (c), (d) 分别为典型的磷酸盐钼玻璃片, KDP 晶体和光束取样光栅的透射波前, 分析区域  $290 \text{ mm} \times 290 \text{ mm}$ , 钼玻璃片像差类型以像散和球差为主, KDP 晶体和 BSG 的像差特征不明显, 但是 KDP 晶体的透射波前存在明显的金刚石车床刀纹痕迹, BSG 的透射波前存在局部陡变。图 2(b) 为大口径反射镜的面形数据, 分析区域  $410 \text{ mm} \times 290 \text{ mm}$ , 像差类型以像散为主。波前质量的定量评价采用 PV 值、均方根值 (RMS) 和梯度均方根 (GRMS) 三个指标, PV 值主要用于描述波前畸变的起伏量, RMS 值相对于 PV 值而言具有更明显的统计特点, 可以消除个别奇异点的影响, 通常情况下波前 PV 值是 RMS 值的 4~6 倍, 这从高斯函数的  $3\sigma$  底宽和腰宽之间的关系很容易理解, 波前梯度和几何光学中的光线方向的概念对应, 因此和光束远场的尺寸关系密切, 相比于 PV 值和 RMS 值, 具有明显的物理含义, 是目前评价低频波前的主要参数。为了消除中

高频成分的影响,表 1 分别列出了经 30 mm 低通滤波前后的波前畸变参数。从表 1 可以发现,反射镜低通滤波前后的面形 PV 和 RMS 变化不明显,说明其对光路主要引入的是低频波前畸变,晶体的波前 GRMS 明显高于其他三种元件,这和美国利弗莫尔实验室(LLNL)在国家点火装置(NIF)上使用的光学元件统计规律相似<sup>[8]</sup>,NIF 装置对 KDP 晶体透射

波前 GRMS 的要求为小于等于 11 nm/cm,对大口径玻璃元件波前 GRMS 的要求为小于等于 7 nm/cm,低通滤波截止空间周期取值为 33 mm,计算表明 30 mm 和 33 mm 低通滤波所得 GRMS 值的差别可以忽略,表 1 说明目前使用的光学元件波前 GRMS 比 NIF 使用光学元件要大约 1 倍,需要改进加工工艺或者采用主动的波前补偿措施加以控制。

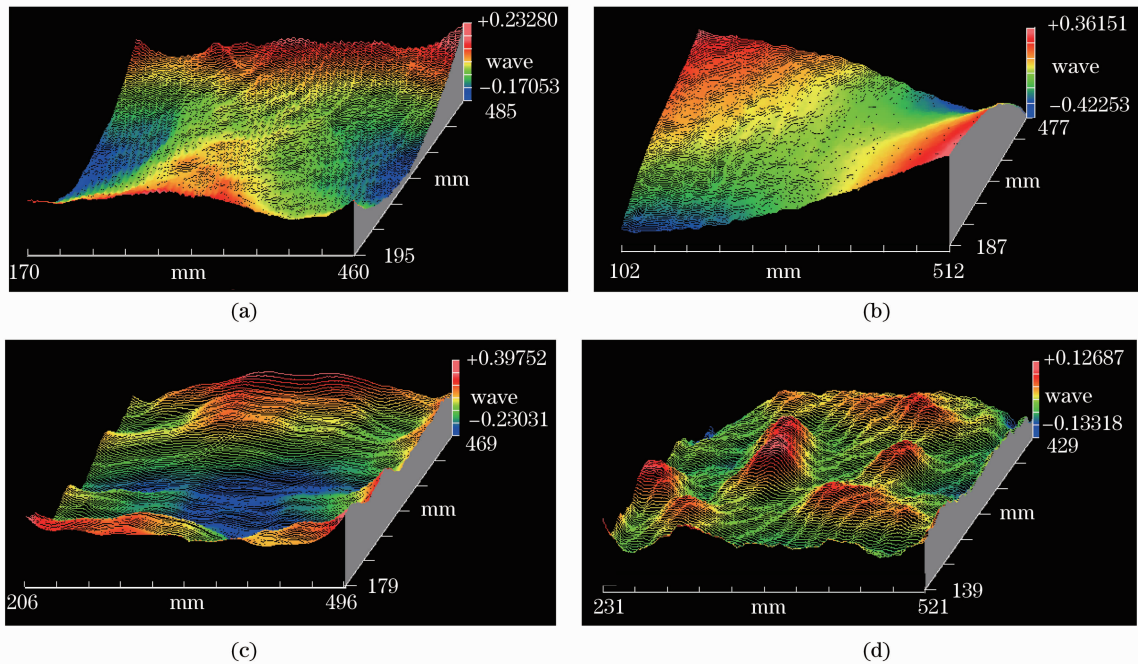


图 2 大口径光学元件透射波前或面形

(a)磷酸盐钕玻璃片透射波前,(b)传输反射镜面形,(c)KDP 晶体透射波前,(d)光束取样光栅透射波前

Fig. 2 Transmitted wavefront or surface figures of large-aperture optical elements

(a)Nd-doped metaphosphate glass, (b) reflected mirror, (c)KDP crystal, (d)beam sampling grating

表 1 大口径光学元件波前质量对比( $\lambda=632.8\text{ nm}$ )

Table 1 Wavefront quality of the large-aperture optical elements( $\lambda=632.8\text{ nm}$ )

Optics type	Original data			Data after 30 mm low pass filter		
	PV / $\lambda$	RMS / $\lambda$	GRMS / (nm/cm)	PV / $\lambda$	RMS / $\lambda$	GRMS / (nm/cm)
Nd glass	0.403	0.061	24.7	0.301	0.058	12
Reflected mirror	0.784	0.133	20.9	0.766	0.130	15.8
KDP crystal	0.628	0.122	37.3	0.536	0.121	30.4
BSG	0.260	0.038	22.1	0.247	0.038	15.8

### 3 系统分段波前畸变特征分析

在分析了大口径光学元件的波前畸变特征后,本节主要分析激光装置的光束波前,主要分空腔波前、主放静态波前、主放动态波前和靶点波前四部分内容。波前测试使用的是中国科学院光电技术研究

所研制的  $22 \times 22$  点阵哈特曼波前传感器,共使用了 9 台传感器,其中 8 台设在 TIL 装置的主放诊断包 PDU(Parameter Diagnostic Unit)中,每路一台,不同传感器之间具有很好的一致性<sup>[9]</sup>,可以保证测试结果的精度。

空腔波前是指图 1 光路中不安装放大器 Amp. 1 和 Amp. 2 时主放输出静态波前, 主要包括预放和空间滤波器透镜及主放小口径光学元件的波前畸变, 在一次放大器维护时测试了 TIL 装置其中一路的空腔波前, 如图 3(a) 所示, 波前以  $45^\circ$  像散为主, PV 值为  $1.5\lambda$  ( $\lambda$  为  $1053\text{ nm}$ , 这里对于光束波前的描述中波长均指光束基频波长), 数据显示时插值为

$128 \times 128$  点阵。在安装放大器后测试到主放大级静态波前如图 3(c) 所示, PV 值为  $3.2\lambda$ , 主放静态波前图 3(c) 和空腔波前图 3(a) 相减即为放大器的透射波前, 放大器由“9+6”共 15 张钽玻璃片组成, 波前中心区域较为平坦, 边缘畸变较大, 以  $0^\circ$  像散为主, 这和图 2(a) 单片钽玻璃的透射波前分布相似, 说明钽玻璃是光束边缘畸变的主要来源。

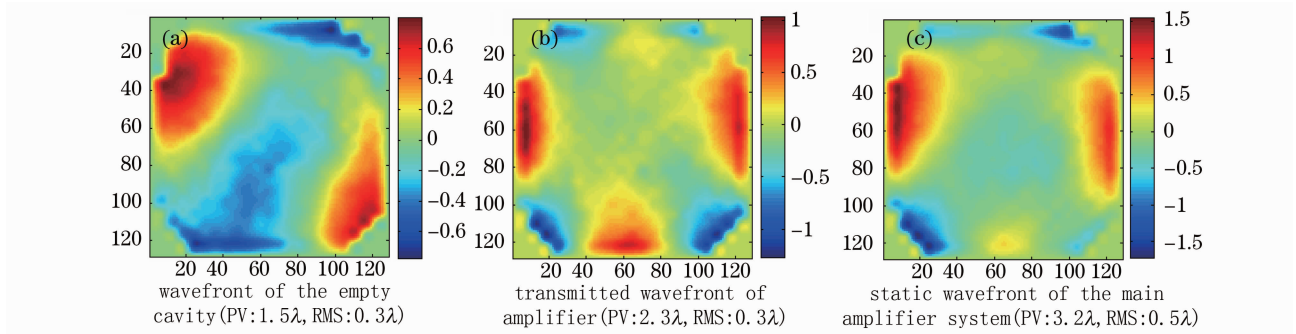


图 3 TIL 主放大级静态波前

Fig. 3 Static wavefront of the main amplifier system

动态波前是指在装置正式发射时主放输出的波前和静态波前之间的差别, 图 4 为 TIL 装置其中一路的动态波前, 主要以离焦为主, PV 值达到  $5\lambda$ , 扣除离焦分量后, 波前 PV 值为  $1.2\lambda$ 。NIF 装置依靠大口径开关和偏振片实现光束在 Amp. 1 (或称 Main amplifier) 中的四程放大, 单片钽玻璃的热畸变呈“S”型, 放大器的动态畸变是所有钽玻璃热畸变的累加, 因此光束动态波前畸变呈“W”型, 以像散为主<sup>[8,10]</sup>。和 NIF 装置不同, TIL 装置采用了  $90^\circ$

旋转的 U 型光束反转器, 光束在放大器 Amp. 1 中两次通过后进入光束反转器, 在反转器中光束  $90^\circ$  旋转后重新进入放大器 Amp. 1,  $90^\circ$  旋转的设计使得 Amp. 1 中钽玻璃热畸变产生的像散转化为以离焦为主, 使得光束焦点在空间滤波器 SF1 四孔和 SF2 小孔位置沿光轴方向后移, 在 SF2 位置的移动量超过  $7\text{ cm}$ , 热畸变的恢复时间比较长, 大约需要  $20\text{ min}$  以上才能恢复到相对稳定的状态, 是影响装置发射间隔的因素之一。

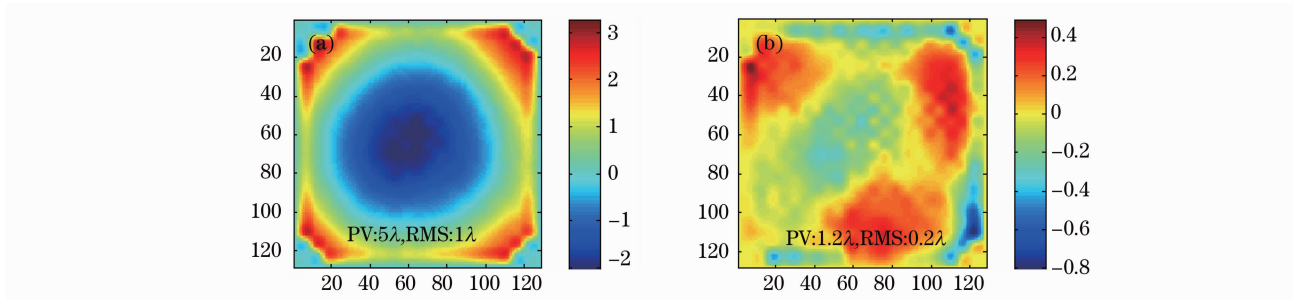


图 4 TIL 主放大级动态波前去除离焦分量前(a)后(b)的对比

Fig. 4 Dynamic wavefront with (a) and without (b) defocus of the main amplifier system of TIL

物理实验最终关注的是靶点的焦斑强度分布, 因此获取全系统的光束波前分布是非常必要的, TIL 装置设计之初主要考虑的是主放大级的波前测量, 为了获得全系统波前畸变, 在靶点位置共用一台哈特曼传感器测量了 8 束光的静态波前。图 5 为其

中畸变量最大和最小的两束, 波前 PV 值最大超过  $6\lambda$ , 像差类型均以像散为主, 表 2 列出了 8 束激光系统在主放大级输出和靶点位置的波前畸变量大小。



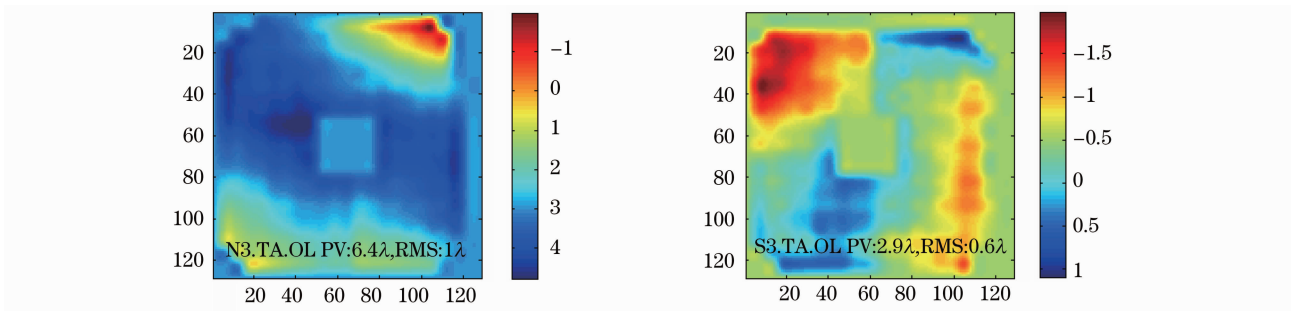


图 5 TIL 靶点静态波前

Fig. 5 Static wavefront at target of TIL

表 2 TIL 装置 8 束光之间波前畸变对比( $\lambda=1053\text{ nm}$ )Table 2 Wavefront aberration of the 8 beams of TIL facility ( $\lambda=1053\text{ nm}$ )

	Static wavefront at main amplifier output		Dynamic wavefront of the main amplifier		Static wavefront at target	
	PV / $\lambda$	RMS / $\lambda$	PV / $\lambda$	RMS / $\lambda$	PV / $\lambda$	RMS / $\lambda$
N1	2.7	0.4	5.0	1.0	4.1	0.8
N2	2.1	0.3	4.3	0.9	3.3	0.8
N3	2.9	0.4	4.0	0.9	6.4	1.2
N4	3.4	0.5	4.4	0.9	4.7	0.7
S1	2.9	0.4	4.2	0.9	4.5	0.7
S2	3.0	0.4	4.9	0.8	5.1	1.0
S3	1.4	0.2	4.8	1.0	2.9	0.6
S4	2.4	0.3	4.1	0.8	3.4	0.7

## 4 结 论

高功率固体激光系统中,同类光学元件的波前特征存在一定的相似性,不同类型的光学元件波前特征存在明显差别,激光系统的主放大级静态波前以像散为主,波前畸变 PV 值通常在  $2\lambda\sim 3\lambda$  ( $\lambda$  为  $1053\text{ nm}$ ) 之间。在采用  $90^\circ$  旋转反转器的多程放大激光系统中,主放大系统动态波前畸变以离焦为主, PV 值在  $4\lambda\sim 5\lambda$  之间,扣除离焦后,动态波前畸变 PV 值约  $1\lambda\sim 2\lambda$ , 全系统最大波前畸变 PV 值可能超过  $6\lambda$ 。该结果为高功率固体激光系统的波前补偿技术方案设计提供了一定的实验依据。

## 参 考 文 献

- Liu Lanqin, Jing Feng, Peng Zhitao *et al.*. Study of the static wavefront distortion of optics elements in the multi-pass amplification system[J]. *High Power Laser and Patical Beams*, 2003, **15**(3): 241~244  
刘兰琴, 景峰, 彭志涛等. 多程放大系统光学元件静态波前畸变研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(3): 241~244
- Keyu Li, Fuquan Li, Bin Feng *et al.*. Development of frequency converter for high-power laser facility[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(s1): 186~189
- Chen Lin, He Shaobo, Yu Haiwu *et al.*. Pump-induced wave-front distortion of the  $4\times 2$  assembled slab amplifier with 400 mm aperture[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 59~63  
陈林, 贺少勃, 於海武等. 400 mm 口径  $4\times 2$  组合式片状放大器的动态热畸变[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 59~63
- Zhao Jianlin, Peng Tao, Ye Zhijun. Hot-image effects in high-power solid-state laser systems[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1315~1322  
赵建林, 彭涛, 叶知隽. 高功率固体激光系统中的“热像”效应[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1315~1322
- Wang Fang, Zhu Qihua, Jiang Dongbin *et al.*. Analysis of system aberration influenced by the lens tilt in a multi-pass amplifier[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(3): 333~336  
王方, 朱启华, 蒋东宾等. 多程放大系统中透镜倾斜对系统像差的影响分析[J]. *激光技术*, 2007, **31**(3): 333~336
- Liu Hongjie, Liu Lanqin, Su Jingqin *et al.*. Lens design based on ghost image and aberration analysis in high-power laser facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 976~980  
刘红婕, 刘兰琴, 粟敬钦等. 基于鬼像和像差分析的高功率激光装置透镜设计[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 976~980
- Deng Qinghua, Zhang Xiaomin, Jing Feng. Phase self correcting method for high power laser amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1225~1229  
邓青华, 张小民, 景峰. 高功率固体激光放大系统相位自校正方法研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1225~1229
- 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
- Jiang Wenhan, Yang Zeping, Guan Chunlin *et al.*. New progress on adaptive optics in inertial confinement fusion facility [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1625~1634  
姜文汉, 杨泽平, 官春林等. 自适应光学技术在惯性约束聚变领域应用的新进展[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1625~1634
- R. A. Zacharias, N. R. Beer, E. S. Bliss *et al.*. Alignment and wavefront control systems of the national ignition facility [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(12): 2873~2884