

# 10 PW 级激光系统波前演变及分析

王建业<sup>1,2,3</sup>, 郭震<sup>1,2</sup>, 於亮红<sup>1\*</sup>, 甘泽彪<sup>1</sup>, 李文启<sup>1</sup>, 梁晓燕<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>上海科技大学, 上海 201210

**摘要** 基于上海超强超短激光装置(SULF),选取各分系统关键节点进行波前测量,分析波前畸变的起源、演变及原因,并讨论了光学器件安装应力与钛宝石晶体质量对波前的影响。结果表明,激光波前畸变值随着大口径光学器件数量的增多而增大,光学镜片的面形加工误差、安装调试误差是影响钛宝石激光放大器中波前畸变的重要因素,对激光的聚焦性能有较大影响。对激光系统波前的测量有利于优化与控制整个系统的波前畸变,从而有助于提升光束质量和聚焦功率密度。

**关键词** 激光器;拍瓦系统;波前演变;焦斑;钛宝石

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0801006

## Wavefront Evolution and Analysis of 10-Petawatt Laser System

Wang Jianye<sup>1,2,3</sup>, Guo Zhen<sup>1,2</sup>, Yu Lianghong<sup>1\*</sup>, Gan Zebiao<sup>1</sup>, Li Wenqi<sup>1</sup>, Liang Xiaoyan<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China

**Abstract** The key nodes of laser subsystems on the Shanghai Ultrafast Laser Facility are selected to measure the laser beam wavefronts, and then the origin, evolution, and causes of wavefront distortion are analyzed. Further, the effects of installation stress of optical devices and quality of Ti:sapphire crystals on the wavefront are investigated. The results demonstrate that the laser wavefront distortion increases with the increasing number of large-aperture optical devices. Facet fabrication and installation and debugging errors of optical lenses are particularly important factors affecting wavefront distortion in a Ti:sapphire laser amplifier. Such errors greatly affect the focusing ability of the laser. Measuring the wavefront of the laser system can help optimize and control the wavefront distortion of the entire system. In addition, such measurements can improve beam quality, focal spot properties, and focusing power density.

**Key words** lasers; petawatt system; wavefront evolution; focal spot; Ti:sapphire

**OCIS codes** 320.7080; 320.7090; 320.7100; 320.7160

## 1 引言

自 1985 年 Strickland 等<sup>[1]</sup>提出啁啾脉冲光放大(CPA)技术以来,超强超短激光技术得到长足发展,输出功率量级已提升至数拍瓦量级<sup>[2-5]</sup>。通过合理的聚焦手段<sup>[6-7]</sup>,这些激光系统可以实现高强度的聚焦功率密度输出,如日本的 J-KAREN-P 激

光系统,使用  $f/1.3$  的离轴抛物面镜(OAP),实现了聚焦功率密度约为  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> 的激光输出<sup>[8]</sup>。2017 年,韩国光州先进光学研究所(APRI)在 4.2 PW 激光系统上通过波前校正技术和  $f/1.6$  的 OAP 获得了  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> 的聚焦功率密度<sup>[9]</sup>。上海超强超短激光装置(SULF)在 2016 年实现 5.4 PW 的峰值功率输出之后<sup>[10-11]</sup>,2017 年完成了 339 J 的

收稿日期: 2019-03-04; 修回日期: 2019-04-03; 录用日期: 2019-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(61775223)、中国科学院战略性科技先导专项(B类)(XDB1603)

\* E-mail: lhyu@siom.ac.cn; \*\* E-mail: liangxy@siom.ac.cn

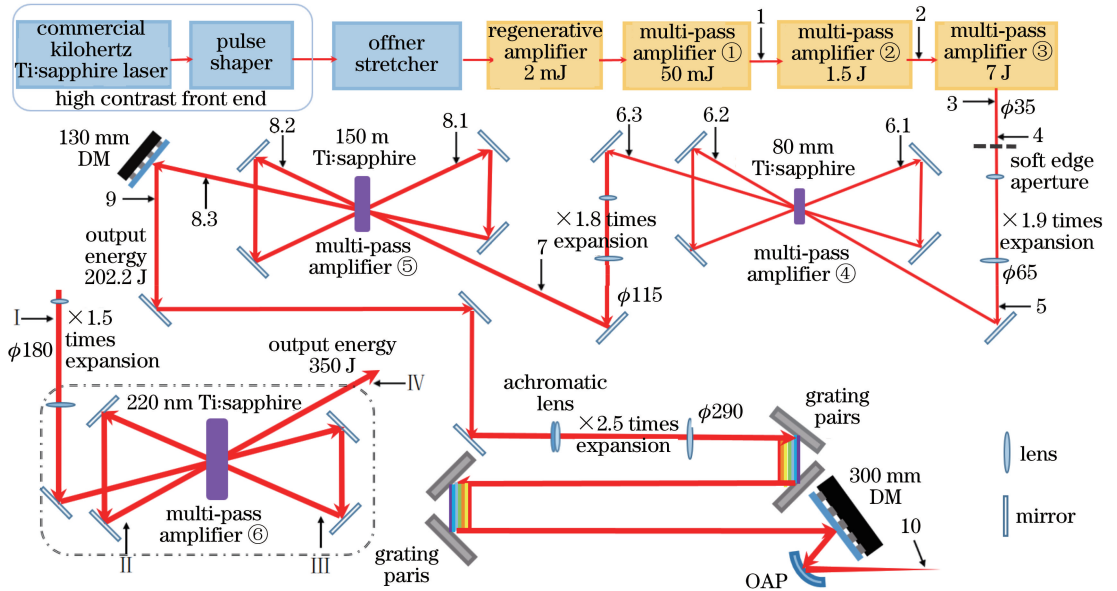
能量输出,能够满足 10 PW 激光装置的能量需求<sup>[12-13]</sup>。超强超短激光系统通过高强度的聚焦功率密度来创造极端强场物理条件,为高能量密度物理实验、惯性约束核聚变等实验的开展提供了极端的实验条件。

波前畸变是影响聚焦功率密度的重要因素之一。拍瓦级激光系统结构复杂,包含大量的反射镜、透射镜及其他光学器件,且光路结构复杂。光学器件加工面形误差等因素会引起光束波前畸变,并随光束在激光系统中传输而增大,最终影响系统的聚焦性能。因此,研究拍瓦级激光系统脉冲的波前产生及演变规律是开展波前校正实验的前提,对于提升拍瓦级激光系统聚焦性能具有重要意义。本文基于中国科学院上海光学精密机械研究所在建的 SULF 装置,逐级测量激光系统的波前畸变量,讨论

各分系统节点波前的变化情况并分析其局部增大的原因。在此基础上,优化激光系统结构和光学器件的安装方式,降低系统静态波前畸变量,并定量分析钛宝石晶体质量对系统波前的影响,为 SULF 系统后期的波前校正及激光聚焦性能提升做好前期研究工作。

## 2 SULF 激光装置介绍

SULF 系统光路结构如图 1 所示。高比对前端产生的 800 nm 宽带种子光经过全反射式 Offner 展宽,脉冲宽度为 2 ns,随后被注入高稳定性脉冲放大器中,得到能量为 2 mJ 的放大输出。输出的激光经过逐级扩束后通过三级钛宝石多通放大光路进行放大(将三次透射后的出光位置分别称为一通、二通、三通),最后得到放大输出能量为 7 J、重复频率为 1 Hz 的激光脉冲输出<sup>[12]</sup>。



1-3: the data acquisition positions after three multi-pass amplifiers; 4: the data acquisition position before the soft-edged aperture; 5: the data acquisition position after 35-65 mm beam expansion; 6.1-6.3: the data acquisition positions after one, two, three pass of 80 mm Ti sapphire amplifier; 7: the data acquisition position after 65-115 mm beam expansion; 8.1-8.3: the data acquisition positions after one, two, three pass of 150 mm Ti sapphire; 9: the data acquisition position after 130 mm DM; 10: the focus position after focusing of OAP; I-IV: the data acquisition positions after 115-180 mm beam expansion and one, two, three pass of 180 mm Ti sapphire

图 1 SULF 系统装置简图

Fig. 1 Schematic of SULF system

经软边光阑整形后,主激光的光斑直径从 35 mm 扩束至 65 mm,进入 80 mm 钛宝石多通功率放大器中进行放大;输出的光斑直径进一步扩束至 115 mm,并进入 150 mm 钛宝石多通功率放大器中继续放大,输出脉冲能量为 202.2 J 的激光,此时光斑进一步扩束至 300 mm,与压缩器光栅尺寸相匹配,从而避免破坏光栅。经压缩器压缩后,激光脉冲宽度为 24 fs,输出峰值功率达 5.4 PW。压缩

后的飞秒激光脉冲经过 300 mm 口径变形镜后,再经过焦距为 721 mm 的 OAP( $f/2.5$ )进行聚焦<sup>[14]</sup>。

中国科学院上海光学精密机械研究所在建的 SULF 10 PW 激光装置在目前的激光系统上增加一台 220 mm 口径的钛宝石主放大器(图 1 的虚线部分),输出激光的光斑直径为 180 mm,输出能量为 350 J。该输出激光通过真空扩束系统扩束至 500 mm 后传输至光栅压缩器内进行脉冲压缩,以

实现功率为 10 PW 激光脉冲输出。

本文主要测量 SULF 激光装置已建成部分的波前畸变,包括经过各级放大器后和经过 150 mm 钛宝石放大器传输至压缩器后的激光脉冲的波前畸变,同时也测试并分析了新增的 220 mm 口径多通放大器对系统波前畸变的影响。

### 3 波前测量方法

首先逐级测量整个系统的波前畸变量并分析其演变规律。实验采用波前探测仪(四波剪切干涉仪, SID4)对 14 个测量点进行测量。

放大部分波前测量光路如图 2(a)所示。主光束经两面白板反射镜衰减后,通过相应缩小比例的

4f 系统,在波前探测仪的探测面上成像。在终端测量方面,为完整地测量包括 OAP 在内的所有光学元件的波前畸变,保证波前探测器和变形镜的成像质量,在测量终端波前畸变时,将 OAP 及其后面的 3 个透镜组成两级 4f 缩束成像系统,将光束的直径缩小至 3.3 mm,如图 2(b)所示。

为降低测量光路引入的误差,将高光束质量光源(光纤耦合光源,波长为 808 nm,单模光纤,光束质量因子  $M^2$  接近 1)作为参考光,对测量光路引入的畸变进行标定。对于放大器部分测量光路,采用扩束后的参考光,并保证参考光和主激光共线;对于终端聚焦部分的测量,则是将光纤激光器耦合输出点设置在 OAP 的焦点位置,以消除测量光路引入的畸变。

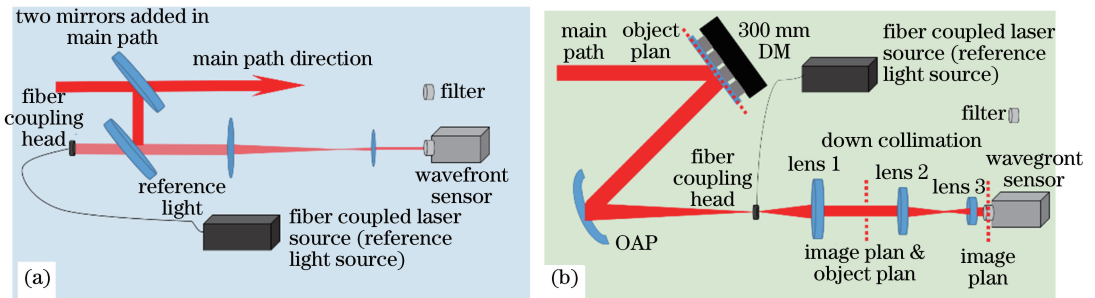


图 2 波前测量光路示意图。(a)放大部分;(b) OAP 部分

Fig. 2 Optical path schematics for wavefront measurement. (a) Amplification part; (b) OAP measurement

### 4 激光系统链路波前演变及结果分析

衡量波前演变的主要参数为测量光束的波前相位峰谷(PV)差值、波前相位方均根(RMS)值、实际点扩展函数与无像差的理想点扩展函数比值——斯特列尔比(SR)值。其中:PV 值和 RMS 值这两项参数具有相关性,且其大小可以直观地衡量波前质量;SR 值用于衡量光束的集中度。

图 3 为激光系统各测量点的波前演变示意图。可以看出,PV 值由前端小口径光斑处的  $0.243 \mu\text{m}$

上升至终端焦点处的  $3.338 \mu\text{m}$ ,整体呈上升趋势。经 35~65 mm 扩束后(测量点 5)的 PV 值小于软边光阑前(测量点 4),这主要是因为经过软边光阑后,光束边缘得到优化。其后,150 mm 钛宝石放大器一通(测量点 6.1)的 PV 测量值低于测量点 5 处的测量值,这与钛宝石对主光束的补偿有关。PV 值在 65~115mm 扩束出光位置(测量点 7)之前,激光光束的 PV 值增幅比较缓慢,这是可能是在此之前的光学器件口径小于等于 100 mm,镜片面形加工误差控制在  $1/10\lambda$  (PV 值)以内。150 mm 钛宝石多通放大器一通后(测量点 8.1)PV 值的增幅迅速增大,这是因为此时的光学器件对角线大于 200 mm,相应的光学器件加工误差控制在  $1/6\lambda \sim 1/8\lambda$ ,光学镜片的面形加工误差累积使得激光脉冲波前在传输过程中逐级增大。此外,更大的光斑意味着所占据的光学器件表面积增大,也会引入更多的边缘畸变。从图 3 可以看到,经过 130 mm DM 的波前畸变值增幅较大,PV 值由  $1.37 \mu\text{m}$  增加至  $2.33 \mu\text{m}$ ,这是因为 130 mm 变形镜采用的是 Bimorph 结构,初始面形的 PV 值额外引入误差约为  $1.36 \mu\text{m}$ ,但不影响它的波前校正功能。RMS 值

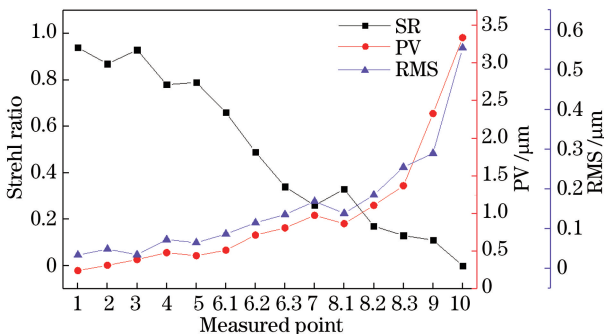


图 3 激光系统各节点波前演变示意图

Fig. 3 Evolution of wavefront at nodes of laser system

的变化范围为  $0.035\sim 0.556\ \mu\text{m}$ , SR 值由 0.94 降至 0,且变化规律与 PV 值保持基本一致。

此外,还通过泽尼克多项式的分解,提取出各个测量点的低阶像差: $0^\circ$ 像散、 $45^\circ$ 像散、X 轴彗差、Y 轴彗差与球差进行分析,数据见表 1。从表 1 数据可以直观地看出主光束通过各个节点后产生的畸变

及具体像差。从整体来看,随着节点位置后移,PV 值与 RMS 值逐渐上升,SR 值则逐渐下降。例如,在测量点 3, $45^\circ$ 像散和 X 轴彗差的绝对值比测量点 1 和 2 的值要大很多,但是由于两者系数相反,且像差分布类似,能够相互补偿,从而导致其 PV 值、RMS 值和前两个测量点相比只是略有上升。

表 1 各节点泽尼克系数测量值

Table 1 Zernike coefficient measurements at each node

Measured point	$0^\circ$ astigmatism	$45^\circ$ astigmatism	X axis coma	Y axis coma	Spherical aberration
1	0.031	0.065	-0.075	-0.019	0.013
2	0.063	-0.001	0.040	0.037	-0.011
3	-0.090	0.225	-0.216	0.190	-0.079
4	-0.156	0.082	-0.140	-0.008	0.013
5	-0.123	-0.125	-0.025	-0.026	0.005
6.1	-0.209	-0.071	0.020	-0.103	0.021
6.2	0.039	0.399	-0.063	0.027	0.011
6.3	0.183	0.176	-0.224	0.069	-0.009
7	0.317	-0.318	-0.097	0.027	-0.057
8	-0.118	-0.382	-0.037	0.347	0.029
9.1	-0.053	0.166	0.173	-0.285	-0.110
9.2	-0.412	0.126	0.206	-0.241	-0.115
9.3	0.671	-0.998	0.007	0.082	-0.110

## 5 220 mm 钛宝石多通放大器波前演变及结果分析

目前,SULF 系统中可实现 10 PW 的峰值功率的激光系统正在搭建。该系统在 2019 年要实现 10 PW 的峰值功率激光的放大输出,需在前期 5.4 PW 装置的基础上增加一级 220 mm 钛宝石主放大器。经过 130 mm DM 后,光斑直径扩束至 180 mm,进入 220 mm 口径钛宝石多通放大器中放大。图 1 虚线框部分为 220 mm 口径钛宝石多通放大器。表 2 列出主激光逐级经过 220 mm 口径钛宝石放大器后的波前测量值,标号 I ~ IV 分别对应 115~180 mm 扩束后和 220 mm 钛宝石放大器一~三通后的位置。可以看出,光束 PV 值由  $2.3448\ \mu\text{m}$  减小到  $2.08\ \mu\text{m}$ ,RMS 值由  $0.3192\ \mu\text{m}$  增加到  $0.2968\ \mu\text{m}$ ,说明 220 mm 口径钛宝石放大器多通放大器内存在着波前畸变补偿机制,导致最终输出的波前畸变量小于入射时的波前畸变量,因此 220 mm 口径钛宝石多通放大器引入的波前畸变量在可控范围内,未来可以采用变形镜进行校正。

从表 2 可以看出,220 mm 钛宝石放大器一通及三通后的 PV 值及 RMS 值均小于前一节点的测

量值,三通后的波前质量略优于入射前光路的波前质量,这与钛宝石放大器的补偿作用有关。从图 4(a)可以看出,220 mm 钛宝石正面存在两个相对的波峰;对比图 4(b)、(c)可以看出,115~180 mm 扩束后的相位分布存在左下角及右上角两个波谷,而在一通后对应位置处的波谷已不明显,可认为恰好被钛宝石透射面形两个波峰所补偿。补偿后整个相位面较一通前更均匀,故出现 PV 值与 RMS 值减小的现象;从图 4(d)可以看出,由于二通后为反向透射钛宝石晶体,左下角波谷变得更加明显,导致其波前畸变量增加;从图 4(e)可以看出,由于钛宝石晶体的进一步补偿作用,三通后的整个相位面较二通后的相位面更加平滑,导致波前畸变下降。

表 2 220 mm 钛宝石放大器各节点的波前测量值  
Table 2 Wavefront measurements at each node for 220 mm Ti:sapphire amplifier

Measured point	PV value / $\mu\text{m}$	RMS / $\mu\text{m}$
I	2.3448	0.3192
II	2.2400	0.3472
III	2.4552	0.3504
IV	2.0800	0.2968



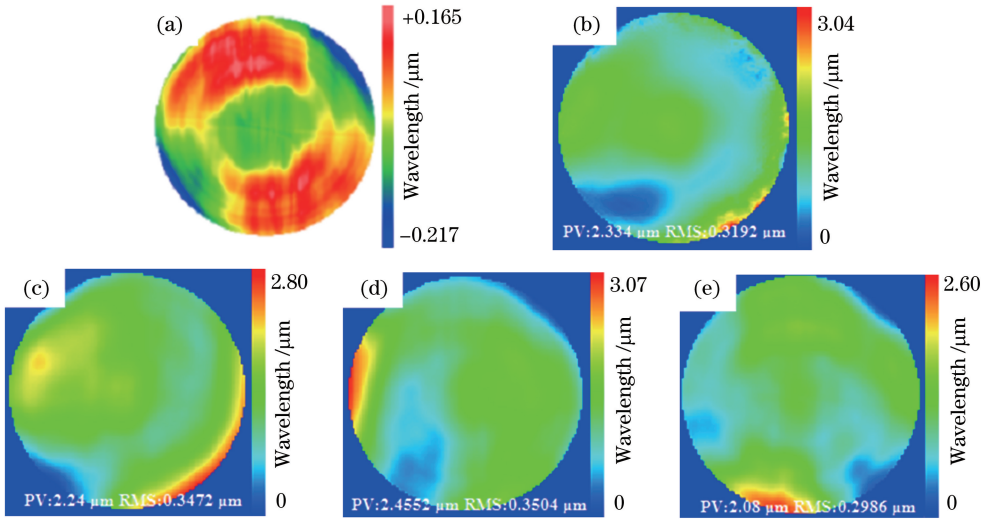


图 4 相位分布图。(a) 220 mm 钛宝石放大器的相位测试图;(b) 115~180 mm 扩束后相位分布;  
(c)一通后相位分布;(d)二通后相位分布;(e)三通后相位分布

Fig. 4 Phase distributions. (a) Phase test pattern of 220 mm Ti:sapphire amplifier; (b) phase distribution after 115-180 mm expansion; (c) phase distribution after one pass; (d) phase distribution after two pass; (e) phase distribution after three pass

## 6 镜面装夹应力对波前的影响

在逐级测量系统波前的过程中,某些节点的波前质量显著降低。对比研究后发现,这主要是因为部分光学镜面安装后表面压块固定过紧,导致镜面的面形产生变化,从而对系统波前质量产生巨大影响。如主光束进入放置在 150 mm 口径钛宝石放大

器前面的爬高镜后,波前畸变达到  $7.66 \mu\text{m}$ ,其相位分布如图 5(a)所示。经排查发现,由于爬高镜的反射镜被装夹得过紧,镜面产生不同的表面应力,从而在激光传输过程中产生较大的畸变量。经过改进后,PV 值下降到  $1.025 \mu\text{m}$ ,波前质量得到较大改善,其变化规律符合波前质量的整体演变趋势,如图 5(b)所示。

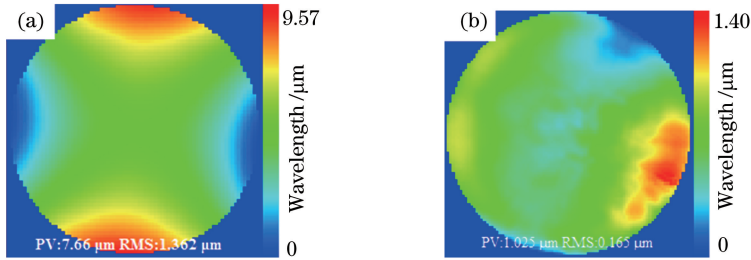


图 5 相位分布图对比。(a)调松压条前;(b)调松压条后

Fig. 5 Comparison of phase distributions. (a) Before adjusting strip; (b) after adjusting strip

多通钛宝石放大器的调试过程中也存在该现象。在钛宝石多通放大器光路的前期调试时,其出光处 PV 值为  $2.88 \mu\text{m}$ ,而前一测量节点 PV 值仅为  $1.2 \mu\text{m}$ ,表明光束波前在此多通放大器处畸变量过大。经过排查,按每一通光路顺序调松反射镜压条并逐级测量 PV 值,成功将该节点的 PV 值降低至  $1.44 \mu\text{m}$ 。

## 7 结 论

逐级测量了 SULF 10 PW 系统中的波前相位,并对畸变产生原因及演变过程进行分析。在实际系

统中,前端光斑尺寸小,小口径透镜面形精度高,均保证波前畸变在可接受范围内(PV 值  $< 0.5 \mu\text{m}$ )。随光束通过的光学器件数量的增多,光程增大,光斑口径增大,以及大口径镜面面形加工误差增大,边缘畸变显著提升,导致系统波前质量显著降低。当节点 PV 值  $> 0.5 \mu\text{m}$  后,增长速度大幅上升,前后节点 PV 值增加量达到  $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ ,并随节点位置后移,增长量进一步提升至  $0.25 \sim 1 \mu\text{m}$ 。考虑到后期的聚焦要求,在畸变较大的 150 mm 钛宝石放大器后放置可变形镜进行校正,以使系统的波前畸变控制在合理范围。同时,讨论了控制光学镜面表面应

力以降低波前畸变的过程,定量测定并分析钛宝石晶体对波前畸变的影响,证明了在一定条件下,光束的波前相位分布可以直观地反映出大口径钛宝石晶体的面形分布。整个系统的波前测量及对来源与演变的过程,对 SULF 10 PW 激光系统的光路搭建及优化、波前校正和提升聚焦功率密度具有一定参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Optics Communications*, 1985, 55(6): 447-449.
- [2] Aoyama M, Yamakawa K, Akahane Y, *et al.* 0.85-PW, 33-fs Ti:sapphire laser[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(17): 1594-1596.
- [3] Yu T J, Lee S K, Sung J H, *et al.* Generation of high-contrast, 30 fs, 1.5 PW laser pulses from chirped-pulse amplification Ti:sapphire laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 10807-10815.
- [4] Chu Y X, Liang X Y, Yu L H, *et al.* High-contrast 2.0 petawatt Ti:sapphire laser system[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29231-29239.
- [5] Chu Y X, Gan Z B, Liang X Y, *et al.* High-energy large-aperture Ti:sapphire amplifier for 5 PW laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 5011-5014.
- [6] Bahk S W, Rousseau P, Planchon T A, *et al.* Characterization of focal field formed by a large numerical aperture paraboloidal mirror and generation of ultra-high intensity ( $1022 \text{ W/cm}^2$ ) [J]. *Applied Physics B*, 2005, 80(7): 823-832.
- [7] Wang X M, Zgadaj R, Fazel N, *et al.* Quasi-monoenergetic laser-plasma acceleration of electrons to 2 GeV [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1988.
- [8] Pirozhkov A S, Fukuda Y, Nishiuchi M, *et al.* Approaching the diffraction-limited, bandwidth-limited petawatt[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20486-20501.
- [9] Sung J H, Lee H W, Yoo J Y, *et al.* 4.2 PW, 20 fs Ti:sapphire laser at 0.1 Hz [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(11): 2058-2061.
- [10] Gan Z B, Yu L H, Li S, *et al.* 200 J high efficiency Ti:sapphire chirped pulse amplifier pumped by temporal dual-pulse [J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5169-5178.
- [11] Fan Z T, Gan Z B, Liang X Y, *et al.* Parasitic lasing in large aperture Ti:sapphire chirped pulse amplifier [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(6): 061401.
- [12] Li W Q, Gan Z B, Yu L H, *et al.* 339 J high-energy Ti:sapphire chirped-pulse amplifier for 10 PW laser facility[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(22): 5681-5684.
- [13] Huang P, Gan Z B, Li W Q, *et al.* Four-outputs Nd:glass pump source for large aperture Ti:Sapphire amplifier[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0801001.  
黄培, 甘泽彪, 李文启, 等. 用于大口径钛宝石放大器的四路钕玻璃抽运源[J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0801001.
- [14] Guo Z, Yu L H, Wang J Y, *et al.* Improvement of the focusing ability by double deformable mirrors for 10-PW-level Ti:sapphire chirped pulse amplification laser system [J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26776-26786.