

# 哈特曼-夏克波前探测器对传导冷却端面抽运板条激光放大器的波前畸变测试

徐鑾婧<sup>1</sup> 杨平<sup>2</sup> 梁兴波<sup>1</sup> 王超<sup>1</sup> 唐晓军<sup>1</sup> 刘洋<sup>1</sup> 刘磊<sup>1</sup> 赵鸿<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>固体激光技术国家级重点实验室, 北京 100015)

(<sup>2</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

**摘要** 固体激光器中热效应引起的波前畸变影响了高光束质量、高功率的激光输出,限制了它在当代工业加工和科学研究领域的应用发展。以激光波前畸变的产生机理和传导冷却端面抽运板条激光器的优势为切入点,利用哈特曼-夏克(H-S)波前探测器进行一系列的波前畸变测试。通过对静态波前畸变量、输出功率百瓦量级时的波前畸变量和输出功率千瓦量级的波前畸变量等结果进行数据分析,对实验进行反馈,提出改进意见,以期进一步减少传导冷却端面抽运板条激光放大器的热效应。

**关键词** 激光器;热效应;波前畸变;传导冷却端面抽运板条;哈特曼-夏克波前探测

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0802006

## Application of Hartmann-Shack Wave Front Detector in Testing Distorted Wave Front of Conduction Cooled End-Pumped Slab

Xu Liuqing<sup>1</sup> Yang Ping<sup>2</sup> Liang Xingbo<sup>1</sup> Wang Chao<sup>1</sup> Tang Xiaojun<sup>1</sup>

Liu Yang<sup>1</sup> Liu Lei<sup>1</sup> Zhao Hong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>National Key Laboratory of Solid-State Laser Technology, Beijing 100015, China)

(<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

**Abstract** High power and good beam quality of solid laser has potential applications in modern industrial processing and scientific research, while the parameters of laser are affected by the dynamic thermal distortion caused by the thermal effect in solid state laser. Taking wave front distortion of the laser and advantage of the conduction cooled end-pumped slab (CCEPS) as a starting point, the wave front distortion caused by thermal effect in the CCEPS is measured by use of Hartmann-Shack wave front detector. By the analysis of results in the measurements of the aberration in the CCEPS, when the output power is different, the dynamic thermal distortion is obtained.

**Key words** lasers; thermal effect; wave front distortion; conduction cooled end-pumped slab; Hartmann-Shack wave front detector

**OCIS codes** 140.3580; 140.6810; 140.4480; 040.1880

## 1 引言

激光工作物质热畸变一直是激光器获得高光束质量、高输出功率的最大障碍。虽然用于抽运固体激光器的激光二极管发光谱线与激光晶体的吸收谱线重合很好,但是由于量子亏损、非辐射跃迁等原因导致的激光介质热沉积依然存在,在强制冷却的条件下依然会在激光介质内产生温度梯度,从而在激

光介质内形成应力场。温度场和应力场将共同导致激光器输出光束的波前畸变<sup>[1~3]</sup>。

板条激光介质可以利用 Zig-Zag 光路周期性穿越温度梯度方向在一定程度上减小热聚焦及应力双折射效应。在 Zig-Zag 光路中,光束成一定角度入射,入射后光束在介质的上下表面来回全反射向前传播,整个光路呈“Z”形结构。当光束从板条的一

收稿日期: 2011-02-10; 收到修改稿日期: 2011-03-31

作者简介: 徐鑾婧(1984—),女,工程师,主要从事高功率固体激光器及相关光学技术等方面的研究。

E-mail: maggie000306@126.com

个表面反射到另一个表面时,光束波前的所有部分都渡越了表面之间的相同温度梯度,所以与温度有关的折射率变化不会引起光学畸变。在理想的条件下,热畸变效应在基质材料内可以得到充分补偿<sup>[4,5]</sup>。

但是这种板条增益介质加工时,要求两个大面的平行度和光洁度都很高,这使加工变得困难且机械安装也变得复杂。此外,两个大面之间还容易产生寄生振荡,使激光效率降低。当对激光增益介质板条进行面冷却并达到热平衡状态时,沿抽运方向的温度分布近似呈抛物线状,同样也会出现类似于圆棒结构的光束质量变差等问题。而且光学畸变只可能在均匀抽运和均匀冷却的无限板条中消失,对于有限宽度和长度的板条,边缘效应和端面效应都会产生形变。在实践中,抽运以及对板条的冷却都会不可避免地产生不均匀性。

2000年, Injeyan等<sup>[6]</sup>在板条激光器的基础上,结合传导冷却和端面抽运技术提出了传导冷却端面抽运板条(CCEPS)激光器方案。CCEPS激光放大器由半导体激光器阵列、透镜组、激光晶体和微通道热沉4部分组成。其中半导体激光器阵列产生的抽运光经透镜组整形后从板条的两端注入激光晶体。激光晶体由掺杂段和未掺杂段两部分组成,未掺杂段通过键合技术粘接在掺杂段两端,并切成45°角。抽运光经斜面反射后沿板条长度方向传输。激光晶体的大表面为全反射面和传导冷却面,并镀有一层SiO<sub>2</sub>薄膜,微通道热沉通过钢焊接在激光晶体上<sup>[7]</sup>。CCEPS激光放大器理论上可以获得较好的光束质量和较高的输出功率,这些优点使其备受关注,在工业和军事中有着重要应用前景。因此,对CCEPS激光放大器的热致波前畸变测试分析成为板条固体激光器的一个研究重点。本文用哈特曼-夏克(H-S)波前探测器对波前畸变进行了一系列测试,并对测试结果进行了数据分析和反馈修正,以期进一步减少CCEPS激光放大器的热效应。

## 2 哈特曼-夏克波前探测器

### 2.1 基本原理与特点

在被测物镜(或者反射镜)前放一块开有许多按一定规律排列的小孔的光阑,常称为哈特曼光阑。光束通过光阑后被分割成许多细光束,只要在被测物镜焦面前后两垂直光轴的截面上测出各个细光束的中心坐标,根据简单的几何关系就可以得到被测物镜的几何像差或者反射镜的面型误差,此被称为

经典的哈特曼方法。经典哈特曼方法焦面前后截得的光斑直径较大,光斑中心坐标的测量精度较低,而且只利用了光阑开孔部分的光线,光能损失较大。夏克(R. K. Shack)于1971年对此方法做了改进,把哈特曼光阑换成一阵列透镜,这样既可以提高光斑中心坐标的测量精度,又大大提高了光能利用率,这样改进后的方法称为哈特曼-夏克法。如图1所示,通过在阵列透镜的焦面上测量畸变波前所成像斑的质心坐标与参考波前质心坐标之差,根据简单的几何关系就可以求出畸变波前上被各阵列透镜分割的子孔径范围内波前的平均斜率,继而根据一定的波前重构算法可以求得全孔径波前的光程差或者相位分布<sup>[8]</sup>。

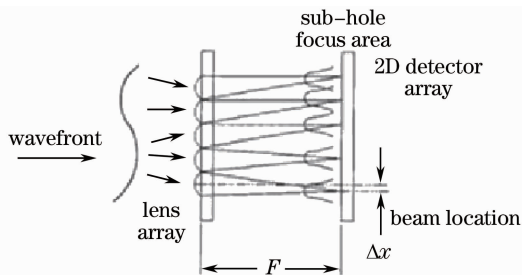


图1 H-S波前探测技术的原理图

Fig. 1 Schematic of Hartmann-Shack method

### 2.2 波前重构原理

利用H-S波前探测器测试波前畸变时,当入射到微透镜阵列上的是标准的平面波时,在CCD的像面上会出现等间隔的光斑阵列,而且每个光斑都应该位于各个子像素阵列的中心,如图2所示。畸变波前入射到透镜阵列上,子像素阵列上的光斑质心将偏离这个中心,如图3所示。通过质心偏移量的计算就可以得到对应子孔径上的波前方向,并根据子孔径的波前斜率进行波前重构计算,进一步计算出整个波面的形状<sup>[9]</sup>。实际应用中,也可以用存在畸变量的波前作为标准参考光波,以测试改变一定外界条件下的该光波的波前畸变量。

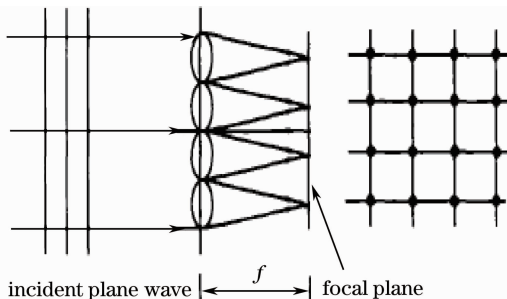


图2 波前基准生成原理图

Fig. 2 Schematic of reference wave front

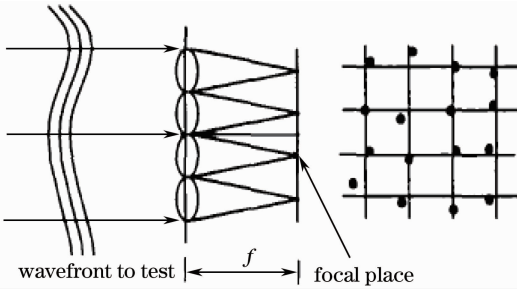


图3 波前畸变重构原理图

Fig. 3 Schematic of distorted wave front

常用的波前重构算法有模式法和区域法等。本文采用模式法中的泽尼克多项式法进行波前重构。由于泽尼克多项式圆域上的正交完备性具有反变换和描述的图像具有最少的信息冗余度的特点,并且各阶模式与光学设计中的 Sedel 像差(如:离焦、像散、彗差等)系数相对应,波前像差可以描述为一组正交泽尼克多项式的线性组合,为有选择地处理各种像差和优化系统提供了有效途径,所以在圆瞳口径上常作为正交基进行波前重构。泽尼克多项式的定义为<sup>[8]</sup>

$$Z_j(\rho, \theta) = \sqrt{n+1} \times \begin{cases} R_n^m(\rho)\sqrt{2}\cos(m\theta) & (j = 2k-1, m \neq 0) \\ R_n^m(\rho)\sqrt{2}\sin(m\theta) & (j = 2k, m \neq 0) \\ R_n^m(\rho) & m = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

$$R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \times \frac{(-1)^s (n-s)! \rho^{n-2s}}{s! [(n+m)/2-s]! [(n-m)/2-s]!}, \quad (2)$$

式中  $\rho$  为极轴,  $\theta$  表示极角,  $m, n$  是整数,  $j$  为模式序数。

依据泽尼克多项式的定义,列举常用的几种低阶像差:0 阶泽尼克多项式的极坐标表达式代表平移;1,2 阶泽尼克多项式的极坐标表达式代表倾斜;3,5 阶泽尼克多项式的极坐标表达式代表像散;4 阶泽尼克多项式的极坐标表达式代表离焦;6,9 阶泽尼克多项式的极坐标表达式代表三阶像散;7,8 阶泽尼克多项式的极坐标表达式代表彗差。

### 2.3 波前畸变的描述

波前像差描述为一组正交泽尼克多项式的线性组合。考虑到最一般的情况,一个动态波前像差可以表示为

$$\phi(\rho, t) = \sum_{j=1}^p a_j(t) z_j(\rho), \quad (3)$$

式中  $z_j(\rho)$  是多项式的第  $j$  项,或者称为第  $j$  阶泽尼

克模式,  $a_j(t)$  是第  $j$  阶泽尼克模式系数,  $t$  是时间序列,  $p$  是波前像差中包含的泽尼克模式阶数。通常为了准确描述某种像差,需要的模式阶数很多,可以达到几十或者上百项。泽尼克模式的特性由径向频率数  $n$  和角向频率数  $m$  决定。

利用 H-S 波前探测器进行测试时,通常用实际波前和理想波前之间的最大偏差(P-V 值)和波前相位均方根值(RMS 值)来描述中低频的相位误差。P-V 值包括正向和负向两个方向,也就是所谓的波峰波谷值,可表示为

$$f_{P-V} = |\phi_{\max}(\rho, t) - \phi_0|. \quad (4)$$

RMS 值是描述光波波前相位变化的量,可表示为

$$f_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{\rho=1}^n \sum_{t=1}^n \phi^2(\rho, t)}{n}}, \quad (5)$$

它结合了数学上均方根的定义,反映了光波前沿不同方向的变化,直接表示了波前上点与点前的相位差,差越大则说明波前起伏越大,反之亦然。

对于 P-V 值来讲,虽然描述简单,但是容易引起误导。并不一定是 P-V 值小的波前就要好于 P-V 值大的波前。而 RMS 值可以较好地描述元件整个表面的统计性质,尤其适用于中低频段误差评价。

## 3 CCEPS 激光放大器的波前畸变测试

### 3.1 静态波前畸变测试

实验是针对 CCEPS 激光放大器的波前畸变测试分析的。实验光路原理图如图 4 所示,光束质量很好的单横模种子光经过一系列扩束、整形后,以合适的角度多次通过板条激光工作介质,其间通过像传递系统和小孔光阑,最后通过适当透射率的分光片和全反片、衰减片和柱面扩束系统进入 H-S 波前探测器。分光片透射率的选取根据输出激光的功率

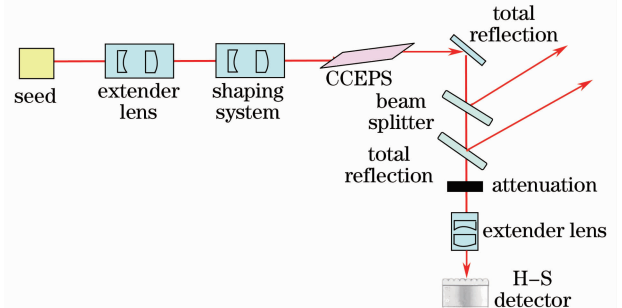


图4 波前畸变测试实验示意图

Fig. 4 Schematic of H-S wave front sensor in testing of distorted wave front

值而定,以防止最后 H-S 波前探测器的 CCD 饱和,影响测试精度。

实验中选取 1064 nm 的近平行激光作为标准参考光波,测试种子光经过全光路后(板条放大器无抽运能量注入)的总体系统静态波前畸变量,主要是为了检测整形系统、像传递系统和光学元件的综合非相干叠加的畸变情况。实验结果如图 5 所示。图 5(a)为 H-S 测试的光斑图,有效子孔径选用 $26 \times 26$ ;图 5(b)为利用泽尼克重构算法后,3~37 阶系数示意图;图 5(c),(d)给出了波面 P-V 值和 RMS 值

的测试结果。从下面的测试结果分析可以得到,全系统光路的静态像差主要有两个大方面:

1) X, Y 两方向的柱面整形系统引入较大像差,这可以从图 5(b)中的  $a_3, a_5, a_6$  阶像散,  $a_4$  阶离焦,  $a_7, a_8$  阶彗差分析得到,并且图 5(b) 中的  $a_3, a_5$  阶像散的值差别很大,显示激光光束一个方向的发散角远大于另一个方向的发散角。

2) 各个光学元件非相干叠加的波前畸变也较明显,如图 5(d)所示 RMS 值在  $1.9 \mu\text{m}$  左右,这体现了非相干叠加的最终结果。

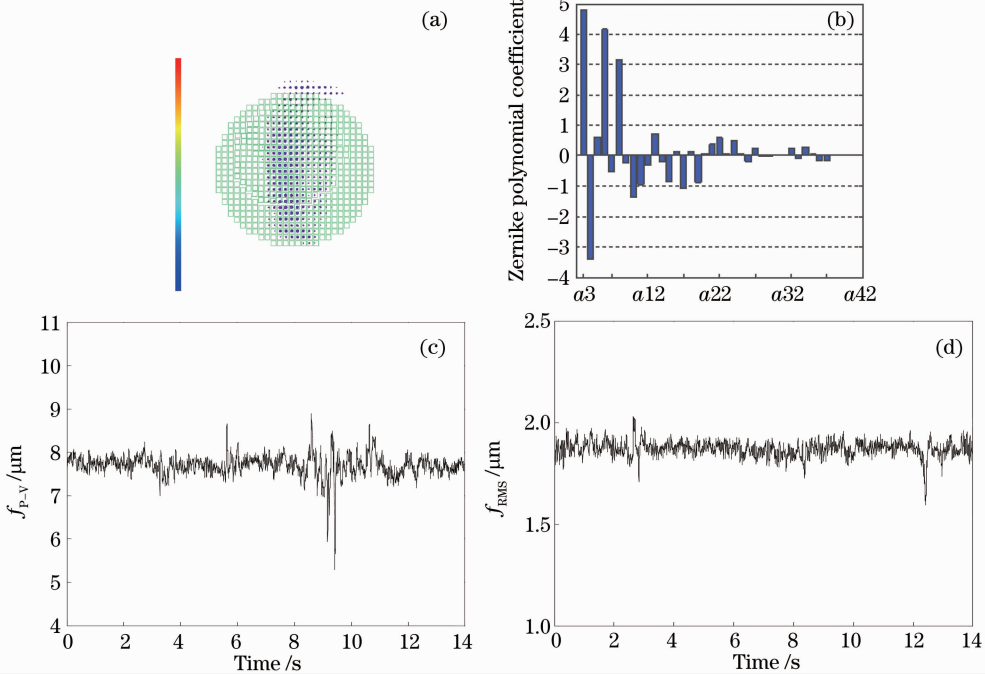


图 5 静态波前畸变测试结果。(a)测试光斑;(b)中低阶 Zernike 多项式系数;(c) P-V 值随时间变化曲线;(d) RMS 值随时间变化曲线

Fig. 5 Schematic of distorted wave front when there is no pumping. (a) Testing facular area; (b) Zernike polynomial coefficient; (c) P-V; (d) RMS

### 3.2 动态波前畸变测试

#### 3.2.1 平均功率百瓦量级 CCEPS 激光放大器波前畸变测试

为了测试当 CCEPS 激光放大器有抽运光注入时引起的系统动态波前畸变,设定全系统整光路静态光(种子光经过全系统光路后)为标准参考光波。这样,就可以比较充分地测试在有相同信号光通过时,整个 CCEPS 激光放大器引起的系统动态畸变量。当注入一定的抽运功率时,初始信号光多次通过 CCEPS 激光放大器,激光放大输出功率达到 220 W,经过分光、全反、衰减、扩束后进入 H-S 波前探测器。当 CCEPS 激光放大器的抽运注入功率刚刚到达额定要求时,测试一系列畸变量,如图 6

所示。当板条激光放大器在功率稳定的情况下连续工作 10 min 后,再测试一系列畸变量,如图 7 所示。通过实验测试结果分析可以看出,CCEPS 激光放大器连续工作 10 min 后的热效应较为明显[图 7(b) 中的  $a_4$  阶离焦量显著变化],而且输出激光的二维发散角在 CCEPS 激光放大器热特性的影响下,差别越加明显[图 6(b)和图 7(b)中的  $a_7, a_8$  阶彗差量显著变化]。由于激光工作介质有一定的热积累,可以看到测试结果中波面的 P-V 值和 RMS 值整体变大,P-V 值由在  $7 \mu\text{m}$  左右波动变成了在  $7.8 \mu\text{m}$  左右波动,RMS 值由在  $1.5 \mu\text{m}$  左右波动变成了在  $1.7 \mu\text{m}$  左右波动,不过基本参数随时间变化的波动都不大[图 6(c),(d)、图 7(c),(d)],说明这个系统

的稳定性还是比较好的。

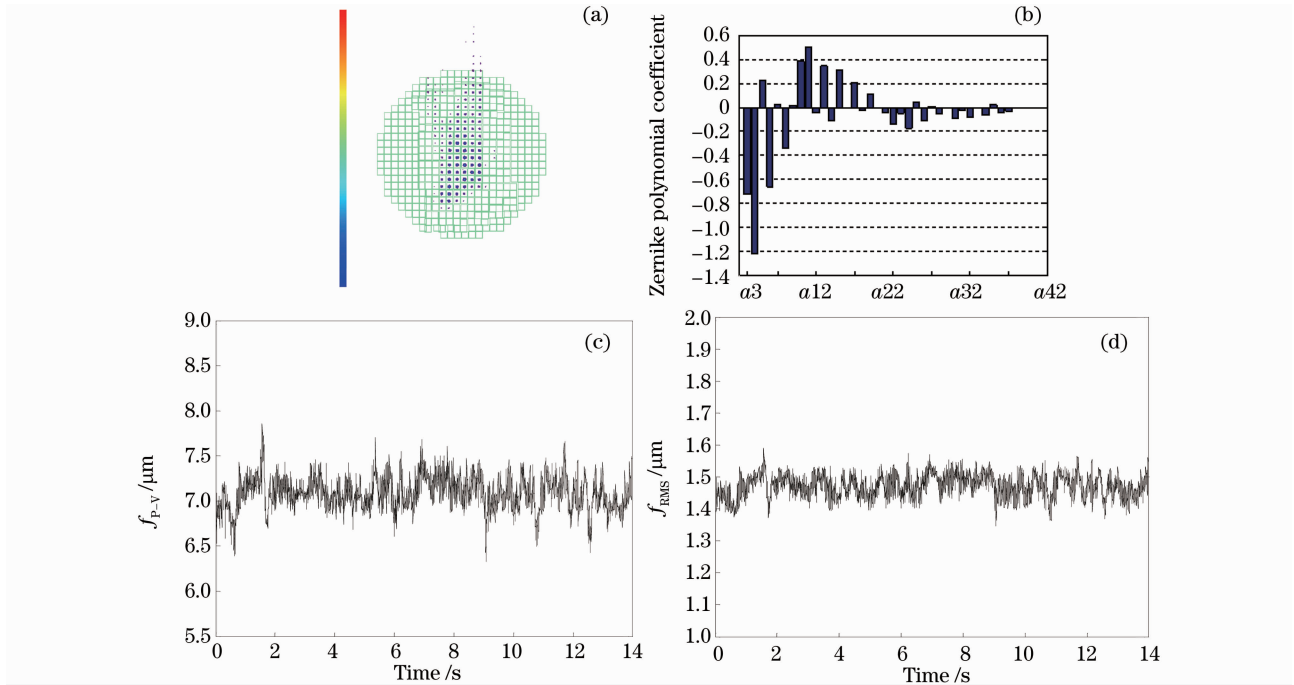


图 6 激光动态波前畸变测试结果。(a)测试光斑;(b)中低阶 Zernike 多项式系数;(c) P-V 值随时间变化曲线;  
(d) RMS 值随时间变化曲线

Fig. 6 Schematic of distorted wave front when output power is 220 W. (a) Testing facular area;  
(b) Zernike polynomial coefficient; (c) P-V; (d) RMS

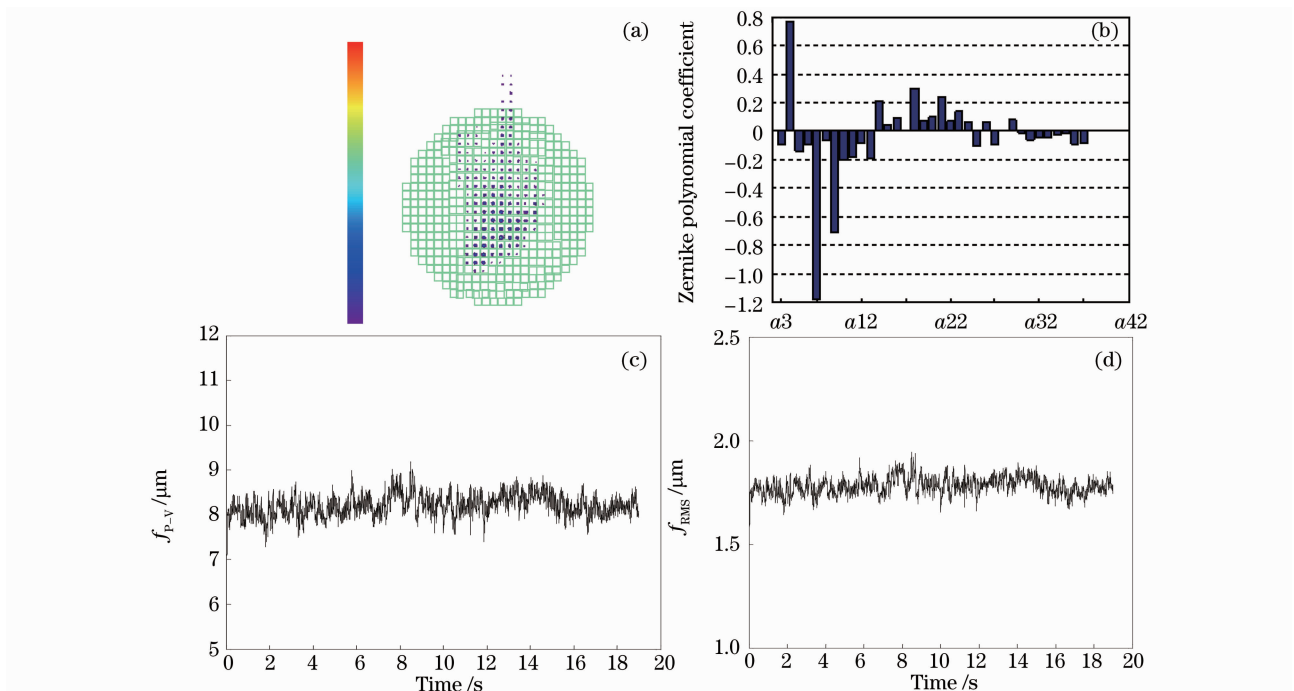


图 7 激光连续工作动态波前畸变测试结果。(a)测试光斑;(b)中低阶 Zernike 多项式系数;(c) P-V 值随时间变化曲线;  
(d) RMS 值随时间变化曲线

Fig. 7 Schematic of distorted wave front when slab laser works continuously. (a) Testing facular area;  
(b) Zernike polynomial coefficient; (c) P-V; (d) RMS

### 3.2.2 平均功率千瓦量级 CCEPS 激光放大器波前畸变测试

再次开展测试,采用串联两级 CCEPS 激光放大器的方式,以用相同功率抽运光注入的一级 CCEPS 激光放大器链路的动态系统畸变量为标准参考量,再测试当第二级 CCEPS 激光放大器有相同功率抽运光注入时引入的链路系统动态畸变,测试实验示意图如图 8 所示。输出激光以主振荡功率放大(MOPA)的方式被放大,初始信号光多次通过第一级 CCEPS 激光放大器,激光放大输出平均功率达到 220 W,再经过第二级 CCEPS 激光放大器,信号光再次被放大,输出平均功率达到 2200 W,经过分光、全反、衰减、扩束后进入 H-S 波前探测器。

使用相同的测试手段和要求,可得到如图 9 所示的实验结果。可以看到当输入的信号光功率增加

时,输出激光波面的 P-V 值变化不明显,仍是在  $7\ \mu\text{m}$  左右波动。由于其热效应仍比较明显,前七阶像差增大,从时间上看,低阶像差的 P-V 值和 RMS 值的变化幅度不大,系统比较稳定。

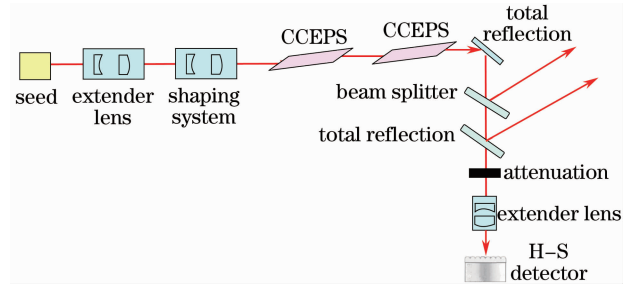


图 8 两级串联时的波前畸变测试实验原理图

Fig. 8 Schematic of H-S wave front sensor in testing of distorted wave front for two series CCEPSs

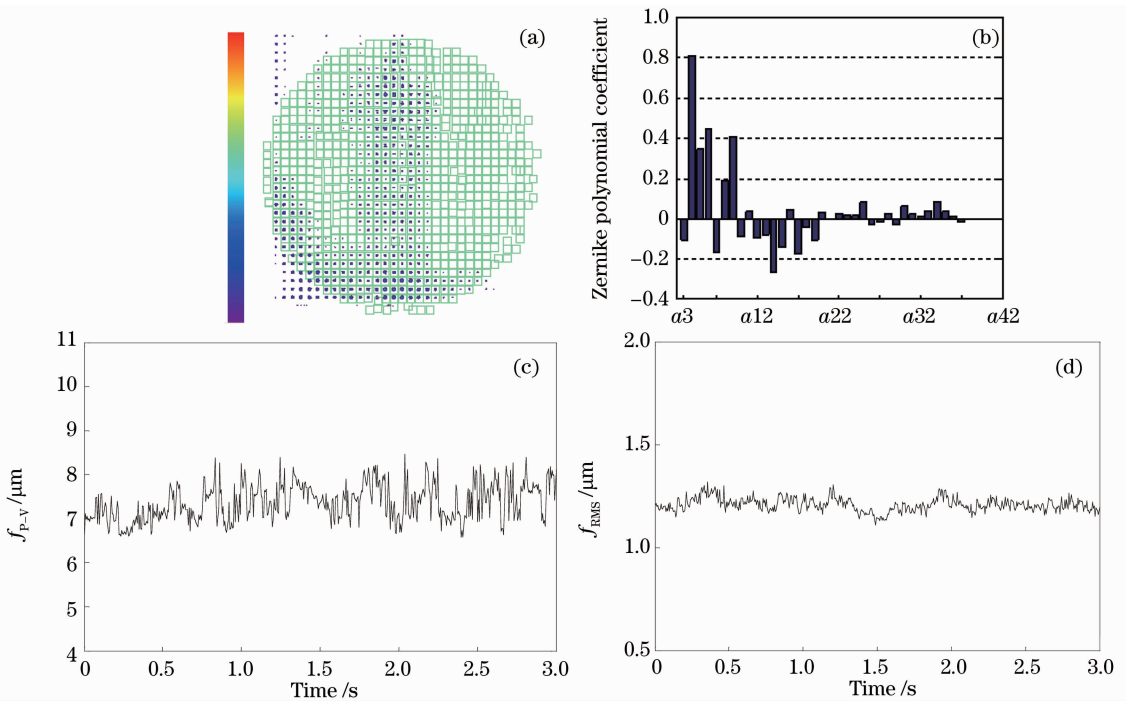


图 9 输出光功率为 2200 W 时激光动态波前畸变测试结果。(a)测试光斑;(b)中低阶 Zernike 多项式系数;(c) P-V 值随时间变化曲线;(d) RMS 值随时间变化曲线

Fig. 9 Schematic of distorted wave front when output power is 2200 W. (a) Testing facular area; (b) Zernike polynomial coefficient; (c) P-V; (d) RMS

通过以上的结果分析,对实验光路进行反馈和修正,认为调整柱面整形系统的光学设计参数、优化各种要求和比例的像传递系统、选取光路光阑进行滤波等方式,都可以对像差起到主动补偿的作用。希望在后续的实验中,可以进一步验证这些补偿方式。

## 4 结 论

以 CCEPS 激光放大器为研究对象,在对 H-S 波前探测技术进行了阐述分析后,利用 H-S 波前探测器对其波前畸变进行了一系列的测试实验,并进行结果分析和反馈修正,提出了对实验光路的改进意见,为进一步提高激光的光束质量和转换效率提

供了依据。但是实验研究中还是存在一定的误差量,首先利用 CCD 法测试质心的位移变化,灵敏度虽然较高,但是选用不同的子孔径数会在一定程度上影响波前重构的计算;其次,波前重构算法采用的是泽尼克模式法,其适应范围较广,表示的像差意义明显,但由于泽尼克模式法仅是在圆域内正交,对于长方形光波的重构会产生一定的误差;最后,由于测试光斑的尺寸较大,会有少部分光超出有效子孔径的范围,这也会给测试带来一定的误差。

### 参 考 文 献

- 1 Liu Jia, Fu Wenqiang, Hu Qiquan. Dynamic thermal aberration measurement of side-pumped slab laser medium[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 511~514  
刘 佳, 付文强, 胡企铨. 侧面抽运板条激光介质动态热畸变测量方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 511~514
- 2 Yin Xianhua, Zhu Jianqiang, Zu Jifeng *et al.*. Calculation of induced refraction index in heat capacity slab laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 225~230  
尹宪华, 朱健强, 祖继锋 等. 热容型板条激光器的感应折射率计算[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 225~230
- 3 Zhang Ling, Yang Shaochen, Li Wenbo. Study on thermal effect of LD side-pumped Nd:YAG laser[J]. *Laser & Infrared*, 2003, **33**(1): 37~39

- 张 玲, 杨少辰, 李文博. LD 侧面泵浦 Nd:YAG 激光器的热效应研究[J]. *激光与红外*, 2003, **33**(1): 37~39
- 4 Zhu Guangzhi, Zhu Xiao, Zhu Changhong *et al.*. Thermal effect study of LD edge-pumped slab laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 37~42  
朱广志, 朱 晓, 朱长虹 等. LD 侧边抽运板条激光器的热效应[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 37~42
- 5 Wang Chao, Tang Xiaojun, Xu Liuqing *et al.*. Investigation on thermal effect of high power slab laser with 11 kW[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2807~2809  
王 超, 唐晓军, 徐鏊婧 等. 输出功率 11 kW 的高功率固体板条激光器介质热分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2807~2809
- 6 Injevan H., Carolyn S. H.. End Pumped Zig-Zag Slab Laser Gain Medium[P]. US patent 6094297, 2000
- 7 Liu Liang, Guo Shaofeng, Lu Qisheng *et al.*. Thermal distortion analysis for conduction cooled end-pumped slab[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(7): 987~992  
刘 亮, 郭少锋, 陆启生 等. 传导冷却端面泵浦板条放大器波前畸变数值研究[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(7): 987~992
- 8 Li Ruixian. The Study of the Thermal Effects and Aberration of Solid-State Laser[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. 9~11, 27~29  
李瑞贤. 固体激光器热效应及其像差研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008. 9~11, 27~29
- 9 Liu Hong. The Application of Hartmann-Shack Wavefront Sensor in Testing of Laser Wavefront and Laser Beam Quality [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2001. 4~6  
刘 虹. 哈特曼-夏克方法在激光光束波前和光束质量检测中的应用研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2001. 4~6