

## 高能激光器波前预补偿技术研究

王 钢, 刘 磊, 王文涛, 吕华昌, 赵 鸿  
(固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

**摘 要:**随着高功率激光技术的发展,目前的以高功率反射式变形镜为核心的波前校正装置只能通过增大口径来避免反射面损伤,还难以解决连续工作加热时的镜面形变问题。本文拟采用低功率变形镜在信号光阶段进行预补偿,达到高功率激光光束质量校正的效果。首先介绍了高能信号光预补偿技术的补偿原理、方法,然后在板条固体激光器输出功率分别为30 W和3000 W时进行了波前补偿实验,通过预补偿方法激光远场光束质量得到明显的改善和提高:在激光器输出功率为30 W时,光束质量从 $\beta=10$ 提高到 $\beta=1.5$ ;在激光器输出功率为3000 W时,光束质量从 $\beta=10$ 提高到 $\beta=3$ ,此外,本文还对非平面波前的信号光传输技术以及信号光预补偿技术的校正策略开展了相应的研究与试验。与传统的自适应光学校正方法相比,信号光预补偿技术可以从根本上摆脱强激光对变形镜的加热和损伤问题,无限的扩展了光束净化系统的功率限制。

**关键词:**波前预校;正板条固体激光器;光束质量;自适应光学

**中图分类号:** O436; TN248.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.09.007

## Research on wavefront precompensation technology of high-energy lasers

WANG Gang, LIU Lei, WANG Wen-tao, LV Hua-chang, ZHAO Hong  
(Key Laboratory of Solid State Laser Technology, Beijing 100015, China)

**Abstract:** With the development of high-power laser technology, the current wavefront correction device with high-power reflective deformable mirror as the core of the wavefront correction device can only avoid the damage of the reflective surface by increasing the aperture, and it is difficult to solve the problem of mirror deformation during continuous work. In this paper, a low-power deformable mirror is used to pre-compensate in the signal light stage to achieve the effect of high power laser beam quality correction. Firstly, the compensation principle and method of the high-energy signal optical pre-compensation technology are introduced. Then, the wavefront compensation experiment is carried out when the output power of the slab solid laser is 30 W and 3000 W respectively. Through the pre-compensation method, the far field beam quality of the laser is significantly improved and enhanced. When the output power of the laser is 30 W, the beam quality is improved from  $\beta=10$  to  $\beta=1.5$ ; When the laser output power is 3000 W, the beam quality increases from  $\beta=10$  to  $\beta=3$ . In addition, the corresponding research and experiments on the signal optical transmission technology of non-plane wavefront and the correction strategy of signal optical pre-compensation technology are carried out. Compared with the traditional adaptive optical correction methods, the signal light pre compensation technology can fundamentally get rid of the heating and damage problems of deformable mirrors caused by intense lasers, and infinitely expand the power limit of the beam cleaning system.

**Keywords:** wavefront precompensate; slab laser; beam quality; adaptive optics

### 1 引言

随着激光功率的不断提升,目前以高功率反射式变形镜为核心的波前校正装置只能通过增大口径(降低功率密度)来避免反射面损伤,难以解决连续工作时的镜面形变问题。本文介绍了一种采用适用于高功率激光的波前畸变校正方法:在高功率放大链路中,首先让信号光在进入放大器之前先通过一个波前校正器(变形镜),然后利用波前传感器测量输出的高功率激光波前畸变,然后通过软件计算出对应的信号光互补波前,再将对应波前转换成波前控制器的输入参数,控制波前校正器产生相应形变,从而改变信号光的波前形状,进而实现放大后的高功率激光波前校正。

### 2 原理介绍

传统的光束净化方法如图 1 所示,信号光通过功率放大器后输出功率大幅度增加<sup>[1-2]</sup>,由低功率激光变成高功率激光,但随着带来的是激光波前产生畸变。高功率激光首先要通过光束变化系统将光束尺寸与变形镜有效区域匹配,覆盖尽可能多的变形镜单元,激光通过变形镜反射后分光采样,利用波前传感器探测激光波前,根据激光波前测量结果反馈到变形镜控制器,由波前控制器控制变形镜产生相应的形变,实现对激光波前的补偿<sup>[3-4]</sup>。

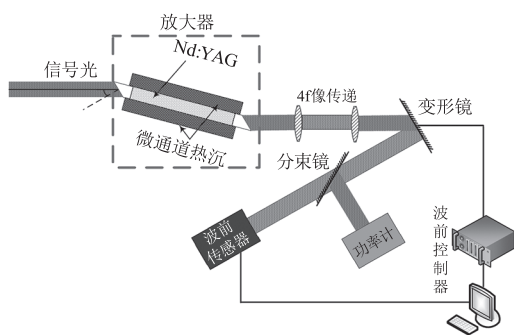


图1 传统的输出端光束净化系统  
Fig.1 Conventional laser correction system

信号光预补偿技术是将变形镜置于激光放大器之前,摒弃信号光应该为优良光束质量激光的传统思想,利用变形镜使信号光波前变为与放大器自有畸变互补的激光波前,这样的信号光通过放大器后,反而被放大器所净化,这种方法可以从根本上摆脱强激光对变形镜的加热和损伤问题,无限的扩展了光束净化系统的功率限制。

在高功率激光放大链路中,通过预补偿低功率的信号光波面,补偿高功率放大过程中的光束畸变。

首先信号光注入放大器之前先通过一个波前控制器,然后利用波前传感器测量高功率激光运转时的波前畸变,然后通过软件计算出对应的信号光互补波前,再将波前转换成波前控制器输入参数,控制波前校正器(变形镜)产生相应形变,从而改变信号光的波前形状,进而实现放大后的高功率激光波前校正。

### 3 关键问题及解决途径

#### 3.1 非平面波前的信号光传输

传统的信号光近似为平面波前,本文采用具有特定波前特征的激光作为信号光(利用变形镜使信号光波前具备特定的波前特征,使其波前分布与后续激光放大器的固有畸变波形互补,这样的信号光通过放大器后,本身的波前畸变被放大器固有畸变所补偿,从而实现波前预补偿的目的),这种信号光在传输过程中光强和光斑大小会产生较大的变化,因此在校正过程中很有可能会对终端输出的激光功率产生较大影响,所以需要通过分析波前对激光传输和口径匹配的影响,确立波前控制的约束条件。

具体方法如图 2 所示,通过给变形镜加载不同的面型,测量终端的激光输出功率,观察哪些像差类型会对激光的透过率产生影响,变形镜所生成的面型分别对应 Zernike 多项式中各种像差类型,如图 3 所示,实验结果如表 1 所示(在变形镜不加电时,输出功率为 34.3 W)。

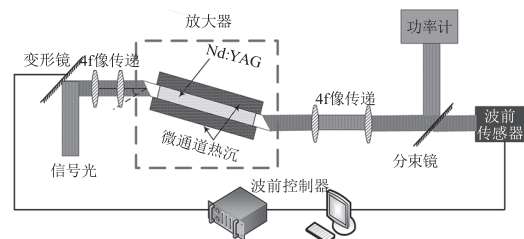


图2 信号光预补偿原理图  
Fig.2 Signal light precompensation schematic

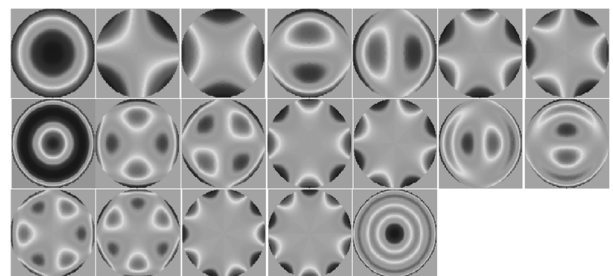


图3 4-22阶泽尼克多项式对应波前  
Fig.3 Wavefront corresponds to the the 4-22 order Zenith polynomial

表 1 特定面型对激光透过率的影响  
Tab. 1 The influence of specific facet types  
on laser transmittance

多项式阶数	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
功率/W	22	27.8	34.3	34.1	34.2
多项式阶数	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11
功率/W	34.3	34.4	34.2	34.3	34.1
多项式阶数	Z12	Z13	Z14	Z15	Z16
功率/W	34.2	34.3	34.2	34.3	34.2
多项式阶数	Z17	Z18	Z19	Z20	
功率/W	34.2	34.3	34.2	34.1	

由表 1 可以看出,变形镜面型变化为 Z2 和 Z3 时对激光功率的影响最大,其余像差类型对激光器功率的影响非常小,基本可以忽略不计。其中 Z2 和 Z3 两项表示 X 方向和 Y 方向的倾斜像差,当变形镜面型加载为 Z2 时,激光远场强度变化如图 4 所示。

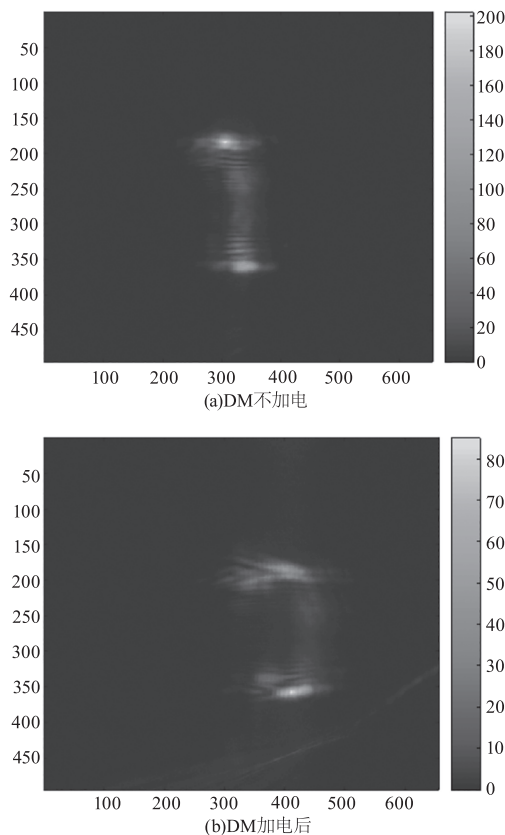


图 4 变形镜变形前后远场强度分布变化情况(Z2)

Fig. 4 Changes of far-field intensity before and after deformation of DM

针对这种情况,为了避免在校正过程中影响激光器的输出功率,在预补偿校正试验中,将会去除对倾斜像差的校正,在需要时将会在激光器的输出端

放置倾斜镜。

### 3.2 校正策略

自适应光学系统一般用哈特曼-夏克作为波前探测器测量畸变波前,然后根据测量波前畸变信息控制变形镜产生相应的形变对畸变波前进行补偿。而在本项目中,需要将激光器终端处测量得到的波前分布与前端的变形镜面型相匹配以及需要在激光器终端处测量前端变形镜的影响函数,实现这两点的难度非常大,因此传统的自适应光学系统在这一情况下就显得力不从心,而基于 SPGD 无波前探测波前校正的方法就可以解决这个问题。

SPGD 算法主要发展于随机逼近 (Stochastic Approximation, SA) 理论和人工神经网络 (Artificial Neural Networks, 简称 ANN) 技术,是 90 年代后期出现的一种优化算法。

#### 3.2.1 SPGD 算法介绍

SPGD 算法原理:设目标函数  $J$  为控制矢量  $u = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_N)$  的函数,即  $J(u) = J(u_1, u_2, u_3, \dots, u_N)$ ,  $N$  为控制矢量的个数。为了确定多元函数  $J(u)$  达到极值时的控制矢量  $u$ ,首先给定  $u$  一个初始值  $u^0$ ,然后从  $u^0$  出发,沿着  $J(u)$  减小(变大)的方向按照下式逐步修正  $u$  值的大小:

$$u_i^{(m+1)} = u_i^{(m)} + \gamma \delta J^{(m)} \delta u_i^{(m)}, l = 1, \dots, N \quad (1)$$

其中,  $m$  是迭代次数;  $\gamma$  为增益系数。

小幅随机扰动  $\{\delta u_j\}$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) 同时(并行)施加到所有  $N$  个控制参数  $\{\delta u_j\}$ ,由此造成的系统性能指标的变化  $\delta J$  可由下式计算:

$$\delta J = J(u_1 + \delta u_1, \dots, u_j + \delta u_j, \dots, u_N + \delta u_N) - J(u_1, \dots, u_j, \dots, u_N) \quad (2)$$

(1) ~ (2) 式即 SPGD 算法的迭代公式,当  $\mu < 0$  时对应着目标函数最小化,当  $\mu > 0$  时对应着目标函数极大化。

SPGD 算法的优点是同时对所有控制参数施加随机扰动,然后根据扰动施加前后目标函数的变化  $\Delta J$  来估算梯度方向  $\partial J / \partial u$ ,从而实现了把优化时间减小到普通梯度算法的  $1/\sqrt{N}$ , ( $N$  为控制参数的个数)。

#### 3.2.2 仿真计算

以 32 单元变形镜作为校正器,图 5 为 32 单元变形镜致动器排布图,由于变形镜的影响函数和高斯函数相似,因此仿真中使用高斯函数表示变形镜各个致动器的变形量。

可以选取激光远场光斑的光强平方和 (CCD 采集光斑图像中每个像素强度的平方之和) 作为 SPGD 算法的目标函数  $J$ ,  $J$  越大, 一方面表明激光功率越高, 另一方面表明激光远场光斑的聚焦效果越好, 即经过校正后的波前畸变越小。波前畸变由 Zernike 多项式进行表示, 由前 10 阶构成, 以低阶像差为主, 如图 6 所示。

校正前后波前及远场强度分布情况如图 6 所示, 校正后波前 rms 值由 0.74 降至 0.15, 远场强度斯特列尔比由 0.6 变为 0.9。

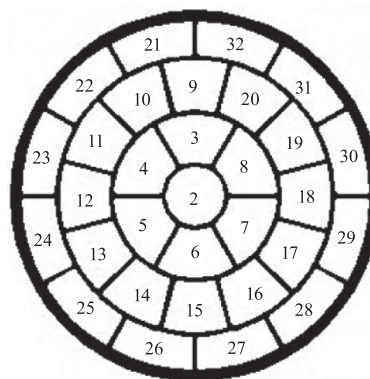


图 5 变形镜致动器分布

Fig.5 Distribution of DM actuator

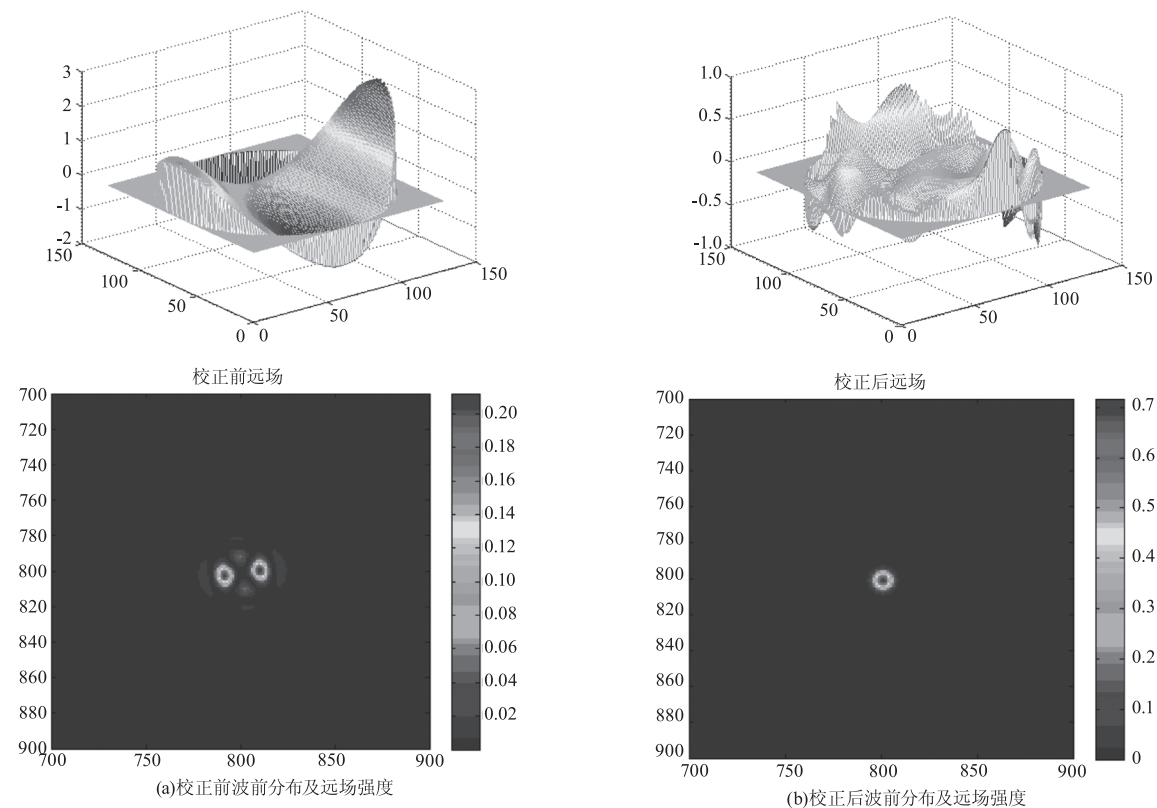


图 6 校正前后对比

Fig.6 Comparison of before and after correction

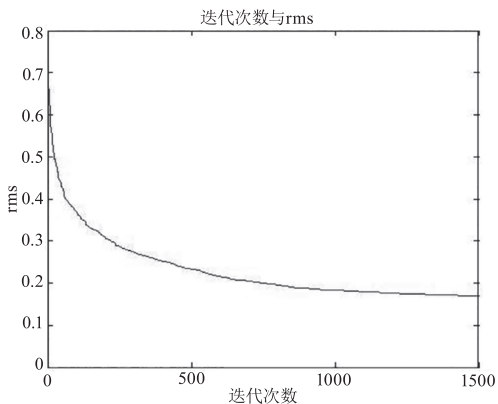


图 7 SPGD 算法迭代收敛过程

Fig.7 The iterates process of SPGD algorithm

### 4 实验过程和结果

本项目的预补偿高功率板条激光器采用 MOPA 方式, 信号光为一个百瓦级的 Innoslab 信号源, 信号源出射激光经过隔离器、整形扩束镜后入射到波前控制器 (变形镜) 上, 激光波前经过变形镜调制后进入放大器。将变形镜置于信号光之后, 放大模块之前, 此处变形镜承受功率小, 因此可以选用致动器间距更小, 分辨率更高的变形镜以提高校正效果。放大器模块采用端面泵浦传导冷却板条激光模块, 光路采用两级双程放大, 输出功率 3 kW 以上。



4.1 实验光路

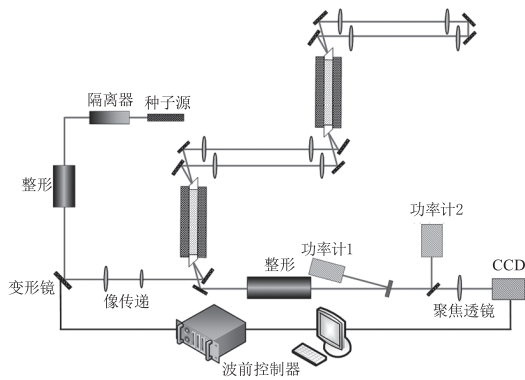


图 8 实验光路

Fig. 8 Experimental optical path

4.2 实验结果

4.2.1 百瓦级信号光预校正实验

首先在信号光输出 100 W, MOPA 放大模块未工作的情况下开展了预校正实验。校正前远场光强分布如图 9 所示, 光束质量  $\beta = 10$ , 最大峰值强度 = 64; 通过使用上述预校正方法, 校正后远场光强分布如图 8 所示。

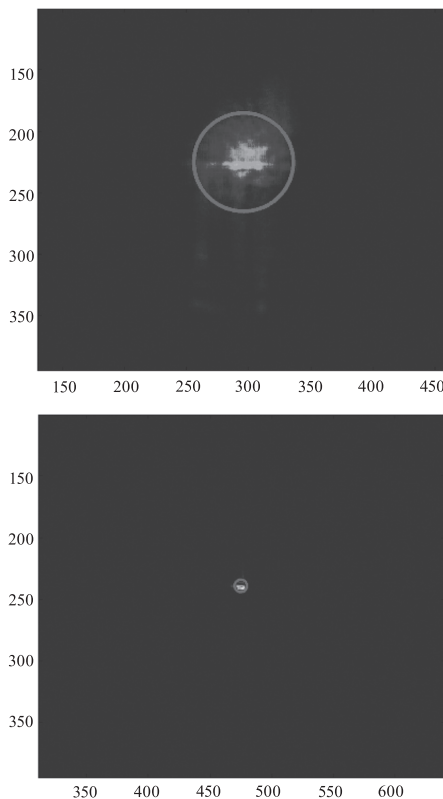


图 9 信号光校正前后远场强度分布

Fig. 9 Far-field intensity of seed laser before and after correction

光束质量  $\beta = 1.5$ , 最大峰值强度 = 255, 具体数据如表 2 所示。

表 2 信号光校正前后数据对比

Tab. 2 Data of seed laser before and after correction

	光束质量 $\beta$	最大峰值强度	备注
校正前	10	64	光束质量提升近 7 倍, 峰值提升 4 倍
校正后	1.5	255	

4.2.2 强光预校正实验

在激光器输出功率 3000 W 的情况下开展了强光的预校正实验。校正前远场光强分布如图 10 所示, 光束质量  $\beta = 10$ , 最大峰值强度 = 74; 通过使用上述预校正方法, 校正后远场光强分布如图 8 所示。

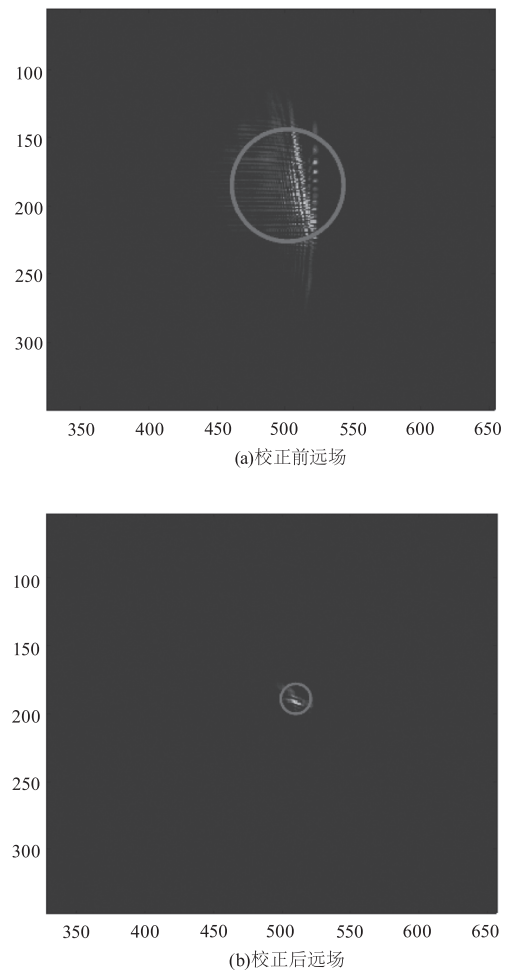


图 10 强光条件下校正前后远场强度分布

Fig. 10 Far-field intensity of amplify laser before and after correction

光束质量  $\beta = 3$ , 最大峰值强度 = 221, 具体数据如表 3 所示。

表3 放大光校正前后对比

Tab.3 Data of amplify laser before and after correction

	光束质量 $\beta$	最大峰值强度	备注
校正前	10	74	光束质量提升4倍, 峰值提升3倍
校正后	3	221	

## 5 结 论

本文采用低功率变形镜在信号光阶段进行预补偿,达到高功率激光光束质量校正的效果,在板条固体激光器输出功率分别为30 W和3000 W时开展了波前补偿实验,通过预补偿方法,激光远场光束质量得到明显的改善和提高:在激光器输出功率为30 W时,光束质量从 $\beta = 10$ 提高到 $\beta = 1.5$ ;在激光器输出功率为3000 W时,光束质量从 $\beta = 10$ 提高到 $\beta = 3$ 。与传统的自适应光学校正方法相比,信号光预补偿技术可以从根本上摆脱强激光对变形镜的加热和损伤问题,摆脱了光束净化系统的功率限制。

## 参考文献:

- [1] Walter Lubeigt, Gareth Valentine, David Burns. Enhancement of laser performance using an intracavity deformable membrane mirror [ J ]. Opt. Express. 16 ( 15 ): 10943 - 10955.
- [2] Stuart J. McNaught, Charles P. Asman, HagopInjeyan, et al. 100 kW coherently combined Nd : YAG MOPA laser array [ C ] // FiO, San Jose, 2009 : FThD2.
- [3] Ping Yang, Bing Xu, Xiang Lei, et al. Correction of static and thermal aberrations of a zigzag slab amplifier employing a wave-front sensor-less adaptive optics system [ J ]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(4) : S21409.
- [4] Ping Yang, Shuai Wang, Lizhi Dong, et al. Adaptive beam cleanup of a 1.3 kW pulsed slab amplifier [ C ] // CLOE, San Jose, 2014 : JTU4A.