



## 双变形镜对Yb:YAG板条激光器光束质量校正技术

李国会 杜应磊 徐宏来 向汝建 吴晶 谢川林 周志强 刘章文 向振佼 张秋实

### Correction of beam quality correction of Yb:YAG laser with double deformable mirrors

Li Guohui, Du Yinglei, Xu Honglai, Xiang Rujian, Wu Jing, Xie Chuanlin, Zhou Zhiqiang, Liu Zhangwen, Xiang Zhenjiao, Zhang Qiushi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IHLA20210800>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 应用于环形激光束的低阶哈特曼波前传感器设计

Design of low-order Hartmann-Shack wavefront sensor for annular laser beam

红外与激光工程. 2021, 50(7): 20210016 <https://doi.org/10.3788/IHLA20210016>

#### 0-1故障模型在自适应光学系统中的应用

Application of 0-1 fault model in adaptive optics system

红外与激光工程. 2018, 47(11): 1111004 <https://doi.org/10.3788/IHLA201847.1111004>

#### 小型化高光束质量MgO: PPLN中红外光参量振荡器

Miniaturized mid-infrared MgO: PPLN optical parametric oscillator with high beam quality

红外与激光工程. 2020, 49(7): 20190512 <https://doi.org/10.3788/IHLA20190512>

#### 综合斜程传输和光束扩展影响下的大气湍流相位屏组设计

Design of atmospheric turbulence phase screen set under the influence of combined oblique propagation and beam propagation

红外与激光工程. 2019, 48(4): 404003 <https://doi.org/10.3788/IHLA201948.0404003>

#### CCD的非线性响应特性对光束质量测量的影响及修正

Impact and correction of CCD nonlinear response on measurement of the laser beam quality

红外与激光工程. 2017, 46(8): 817004 <https://doi.org/10.3788/IHLA201746.0817004>

#### 横向压电驱动变形镜的迟滞特性及其闭环校正

Hysteresis characteristics and closed loop correction of unimorph deformable mirror

红外与激光工程. 2018, 47(10): 1020001 <https://doi.org/10.3788/IHLA201847.1020001>

## 双变形镜对 Yb:YAG 板条激光器光束质量校正技术

李国会<sup>1,2</sup>, 杜应磊<sup>1,2</sup>, 徐宏来<sup>1,2</sup>, 向汝建<sup>1,2</sup>, 吴晶<sup>1,2</sup>, 谢川林<sup>1,2</sup>, 周志强<sup>1,2</sup>,  
刘章文<sup>1,2</sup>, 向振蛟<sup>1,2</sup>, 张秋实<sup>1,2</sup>

(1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;  
2. 中国工程物理研究院 高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 分析了 Yb:YAG 板条激光器波前畸变的基本特征, 结合光斑形态和功率密度, 提出了采用水冷式 13 单元一维变形镜和 95 单元二维变形镜相结合的双变形镜组合模式对 Yb:YAG 板条激光器的波前畸变进行闭环校正。针对输出激光的特征进行了校正需求分析和校正能力分析, 以此为基础开展了一维变形镜和二维变形镜的仿真及优化设计, 同步开展了哈特曼和高压驱动系统等硬件的研制。研制出的变形镜经受了满功率出光考核, 验证了内循环冷却装置对水冷式变形镜的冷却效果, 随后在闭环校正实验中, 将激光器的开环光束质量  $\beta=9.03$  提升至闭环的 1.98, 验证了双变形镜组合模式的自适应光学系统对 Yb:YAG 板条激光器光束质量校正的能力。

**关键词:** 波前畸变; 变形镜; 光束质量; 哈特曼传感器

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210800

## Correction of beam quality correction of Yb:YAG laser with double deformable mirrors

Li Guohui<sup>1,2</sup>, Du Yinglei<sup>1,2</sup>, Xu Honglai<sup>1,2</sup>, Xiang Rujian<sup>1,2</sup>, Wu Jing<sup>1,2</sup>, Xie Chuanlin<sup>1,2</sup>, Zhou Zhiqiang<sup>1,2</sup>,  
Liu Zhangwen<sup>1,2</sup>, Xiang Zhenjiao<sup>1,2</sup>, Zhang Qiushi<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;  
2. Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The basic characteristics of the wavefront aberration of Yb:YAG slab laser were analysed. Combined with spot shape and power density, a double deformable mirror combined of water cooled 1D DM of 13 units and 2D DM of 95 units was proposed to correct the wavefront aberration of Yb:YAG slab laser. According to the characteristics of the output laser, the calibration demand analysis and calibration capability analysis were carried out. Based on this, the simulation and optimization design of the 1D DM and 2D DM were improved. The beam quality of the laser was improved from 9.03 to 1.98 in the correction experiment. The beam quality correction ability of the adaptive optical system with double DM combination mode for Yb:YAG slab laser was verified.

**Key words:** wavefront aberration; deformable mirrors; beam quality; Hartmann-Shack sensor

收稿日期:2021-11-18; 修订日期:2021-12-01

基金项目:中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室项目

作者简介:李国会,男,高级工程师,主要从事主动光学控制技术方面的研究。

## 0 引言

二极管泵浦的 Yb: YAG 激光器为准三能级激光器, 在 941 nm 抽运和 1030 nm 激光输出时的量子亏损约为 9%<sup>[1-2]</sup>, 相较于 Nd:YAG 激光器来说, 具有量子亏损低、吸收光谱和发射光谱宽等优点<sup>[3-5]</sup>, 可以获得更高的光-光转换效率<sup>[6-8]</sup>, 在激光通信、医疗以及国防领域具有广泛的发展及应用前景<sup>[9-13]</sup>。随着激光器输出功率的提高, 增益介质材料的均匀性、泵浦光的均匀性、板条冷却的均匀性以及板条内部的热应力等因素会导致输出激光的波前产生变<sup>[14-18]</sup>, 致使输出功率和光束质量二者难以兼顾<sup>[14-19]</sup>。2009 年, 信达公司提出了 ThinZag 板条激光器, 采用“之”字形光路, 大大减小了热效应引起的波前畸变<sup>[20]</sup>, 但是, 板条内部的热效应是不可避免的, 所以提升热管理等技术水平是抑制波前畸变的重要途径<sup>[18]</sup>, 但无法彻底解决波前畸变导致的光束质量退化问题。为此, 国内外同行均采用自适应光学系统对固体板条激光的波前畸变进行主动校正, 这是改善光束质量的重要举措<sup>[21-23]</sup>。中国工程物理研究院应用电子学研究所自适应光学研究团队 2010 年开始围绕固体激光光束质量校正技术开展了大量的研究工作, 研制出了校正固体板条激光器波前畸变的 11 单元一维变形镜<sup>[24]</sup>和 67 单元二维变形镜<sup>[25]</sup>以及哈特曼探测系统和高压驱动系统, 对 8 路合成的 Nd:YAG 激光器的波前畸变进行校正, 获得了光束质量为 1.67 的激光输出<sup>[26]</sup>。

文中借鉴 Nd:YAG 激光器光束质量校正的经验, 结合 Yb:YAG 激光器出口光斑形态、功率密度和输出波前的基本特性, 研制了水冷式 13 单元长条形一维变形镜和 95 单元长方形二维变形镜以及哈特曼探测

系统和高压驱动系统, 并使用双变形镜组合模式对 Yb:YAG 激光器开展光束质量校正实验, 将激光器的开环光束质量  $\beta=9.03$  提升至闭环的 1.98, 验证了双变形镜组合模式对 Yb:YAG 板条激光器光束质量校正的能力, 同时为后续工程应用提供了技术支持。

## 1 波前特性分析

双变形镜对 Yb:YAG 板条激光器光束质量校正的光路如图 1 所示。激光器出口光斑大小为 2.5 mm×40 mm, 一级扩束后入射到一维变形镜上的光斑尺寸为 6 mm×80 mm, 经过二级扩束后入射到二维变形镜上的光斑尺寸为 40 mm×80 mm, 经分光镜后强光发射出去, 弱光进入哈特曼探测系统进行波前测试。

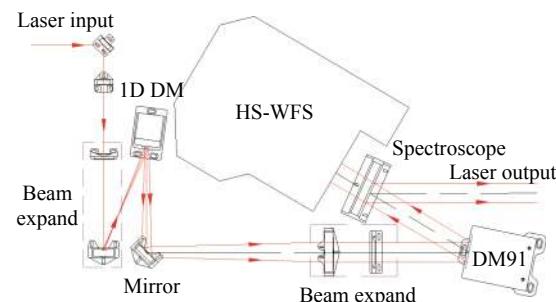


图 1 双变形镜对 Yb:YAG 激光器波前畸变校正光路图

Fig.1 Optical path diagram of wavefront aberration correction of Yb:YAG laser with double deformable mirrors

典型的端泵浦板条激光器波前畸变特性如图 2 所示, 左边是空间分布特性, 右边是时间频率特性。从空间分布特性来看, 板条厚度方向上波前畸变小, 板条长度方向上存在较大局部梯度和较大幅度的波前畸变; 从时间频率特性来看, 10 Hz 以下占比>90%, 20 Hz 以下占比>95%。

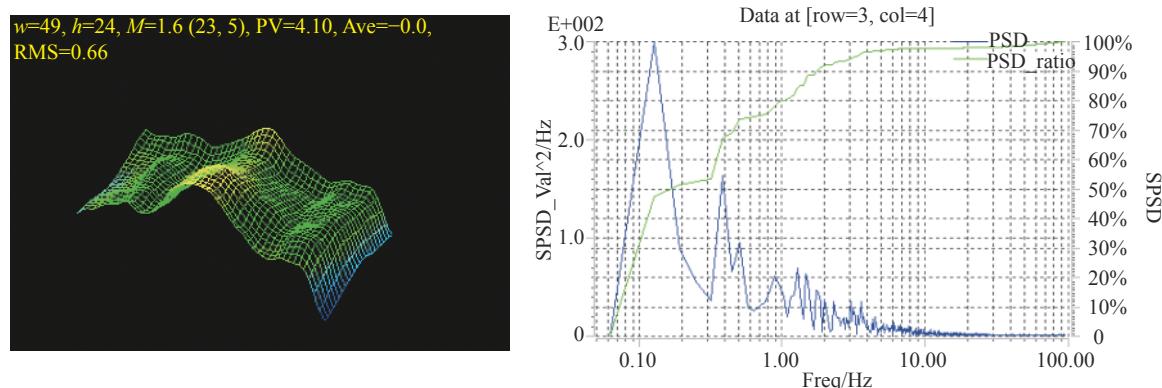


图 2 端泵浦板条激光波前畸变空间和时间分布特性

Fig.2 Spatial and temporal distribution of wavefront aberration in pumped slab laser

对波前畸变前 100 项 Legendre 多项式模式系数分解得知, 系数绝对值最大值为 1.18, 像差主要成分以低阶为主; 系数大于 0.05 的共计 52 项, 最小值为 0.0504, 在前一百项系数中占比 88.3%。图 3 所示为前 100 项模式系数分解图。

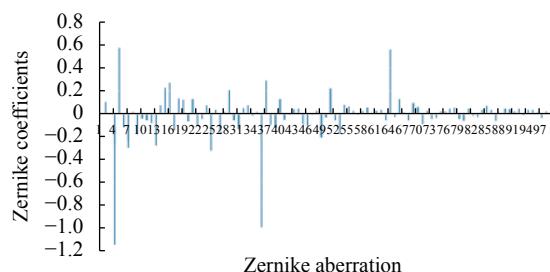


图 3 激光器输出波前畸变前 100 项模式系数

Fig.3 First 100 mode coefficients of laser output wavefront aberration

通过激光器波前畸变的时间分布特性和空间分布特性的分析以及对模式系数的分解, 对激光器输出激光的基本特征有了更进一步了解, 便于后续开展自适应光学校正系统的参数设计和研制。

## 2 校正能力分析

根据光束波前畸变的特征, 以正方形光斑作为仿真对象, 对二维变形镜的排布方式、间距、铰链值以及动态范围进行模拟仿真, 优化自适应光学系统的技术参数, 提升波前畸变的校正能力, 最大限度地改善输出激光的光束质量。图 4 分别为变形镜作动器“田”字形排布和六边形排布示意图, 下面根据排布方式开展校正能力分析。

图 5 为变形镜作动器“田”字形排布对前 195 项 Legendre 多项式像差的模拟校正效果, 图 6 为变形镜作

动器伪六边形排布方式对前 195 项 Legendre 多项式像差的模拟校正效果。对比图 5 和图 6, 两种排布方式对波前畸变的校正效果相差不大, 从作动器布局方便结构简单角度出发, 选择“田”字形排布为驱动器布局模式。

变形镜作动器的间距对校正效果的影响可以采用归一化空间频率或单位孔径范围内有效作动器行列数来模拟仿真。图 7~图 9 是作动器间距行列数分别为  $13 \times 13$ 、 $14 \times 14$  和  $15 \times 15$  对应的各阶 Legendre 像差的校正效果。从图 7~图 9 的分析结果可以看出, 变形镜作动器越密, 校正能力越强, 但过高的空间分辨率不但增加成本, 还会约束作动器间的有效校正行程。对于前 100 项 Legendre 像差而言, 行列数  $14 \times 14$  即可较好的满足校正需求。

变形镜铰链值会影响面形拟合精度和作动器间的关联系数, 图 10 为自适应光学系统闭环控制过程中不同铰链值与波前重构矩阵条件数的关系曲线, 条件数越大, 控制过程越容易失稳。

作动器排布方式相同时不同铰链值对同一波前畸变的校正仿真效果如图 11 所示, 其中, 图 (a) 为原始波面, 图 (b) 是铰链值为 0.2 输出光束质量  $\beta=1.464$  时的波面, 图 (c) 是铰链值为 0.25 输出光束质量  $\beta=1.335$  时的波面, 图 (d) 是铰链值为 0.3 输出光束质量  $\beta=1.228$  时的波面。从仿真结果来看, 随着铰链值的增大, 光束质量  $\beta$  值会逐步减小, 同时变形镜面厚度也会增加, 相邻作动器之间的相对行程将会减小, 变形镜的动态范围随之减小, 但镜面厚度增加有利于面形的稳定性, 故在选择铰链值与镜面厚度的过程中, 需要相互兼顾, 在保证动态范围的情况下, 铰链值一般选在 0.25~0.40 之间。

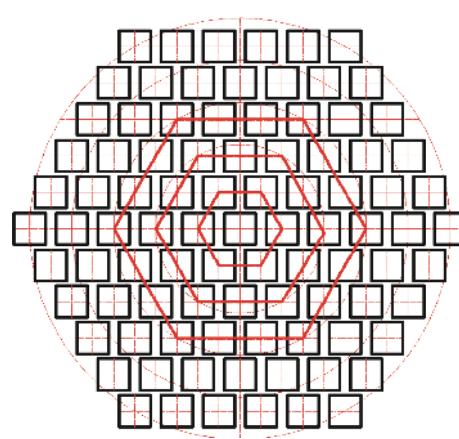
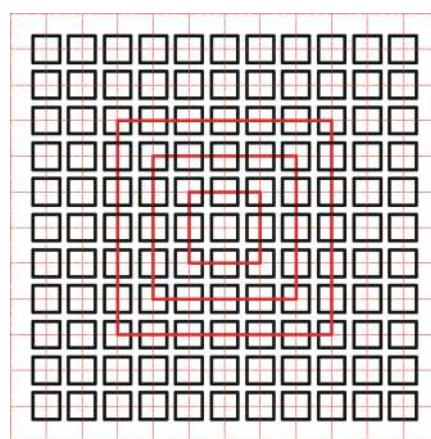


图 4 变形镜作动器六边形和“田”字形排布示意图

Fig.4 Schematic diagram of hexagonal and “田” layout of DM actuator

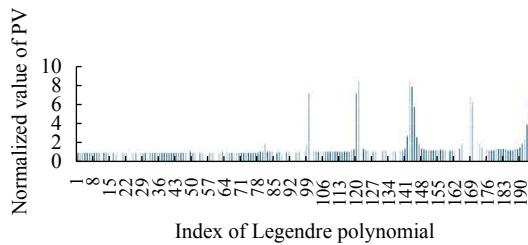


图 5 变形镜作动器“田”字形排布对 Legendre 像差校正残差

Fig.5 Legendre aberration correction residual by “田” arrangement of DM actuator

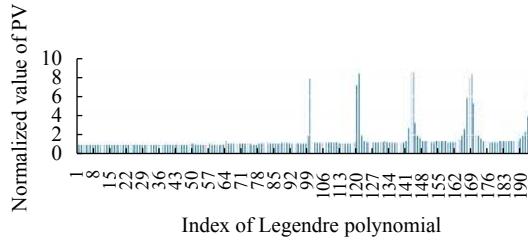


图 6 变形镜作动器伪六边形排布对 Legendre 像差校正残差

Fig.6 Legendre aberration correction residual by hexagonal arrangement of DM actuator

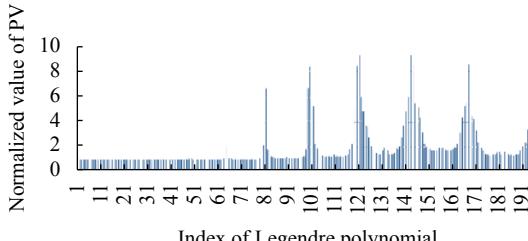


图 7 作动器行列数为  $13 \times 13$  的变形镜对各阶 Legendre 像差的校正效果

Fig.7 Correction effect of DM with  $13 \times 13$  actuators on Legendre aberration

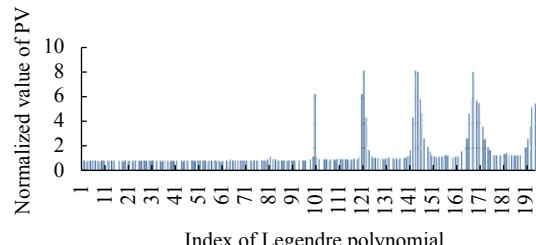
图 8 作动器行列数为  $14 \times 14$  的变形镜对各阶 Legendre 像差的校正效果

Fig.8 Correction effect of DM with  $14 \times 14$  actuators on Legendre aberration

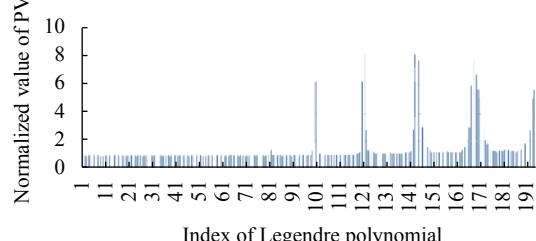
图 9 作动器行列数为  $15 \times 15$  的变形镜对各阶 Legendre 像差的校正效果

Fig.9 Correction effect of DM with  $15 \times 15$  actuators on Legendre aberration

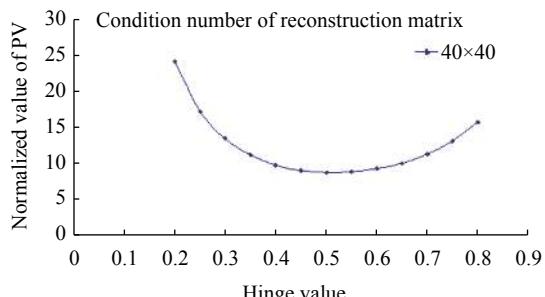


图 10 铰链值与 AO 系统控制矩阵条件数关系曲线

Fig.10 The curve between hinge value and condition number of AO system reconstruction matrix

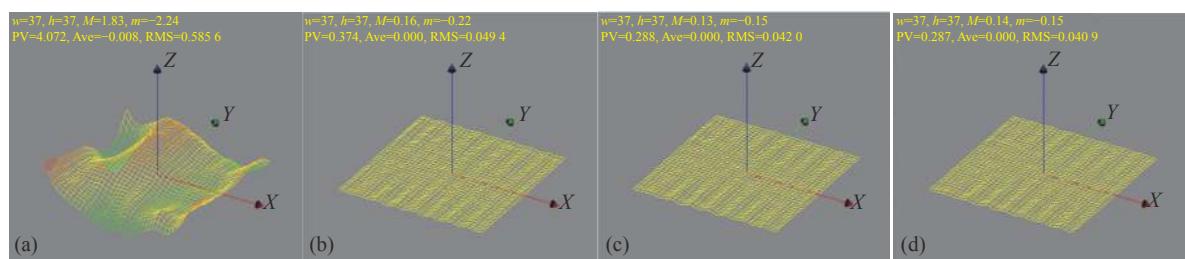


图 11 不同铰链值对同一波前校正仿真效果图

Fig.11 The simulation results of different hinge values on the same wavefront correction

### 3 变形镜仿真与设计

图 1 光路中, Yb:YAG 板条激光器经两次扩束整

形后再发射出去, 13 单元一维变形镜用于校正  $6 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$  光斑长度方向上的大梯度波前畸变, 95 单元二维变形镜对  $40 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$  光斑波前畸变进

行二次校正。由于功率密度较高,均采用去离子水作为冷却介质对镜子背面进行主动冷却,降低镜面温升,减小镜面热畸变引入的额外像差。

一维变形镜作动器排布方式如图12所示。窄方向两个作动器并联在一起组成一个单元,镜面长度方向上共13个单元,驱动器间距为7 mm。图13是第6单元应力和应变仿真结果,应变为3.42 μm,应力为12.2 MPa,远小于材料的许用应力,镜面破裂几率较小。

图14为经仿真并优化设计后的一维变形镜外形图。

二维变形镜作动器排布方式如图15所示。长方形镜面尺寸为70 mm×108 mm,长度方向作动器间距为6.7 mm,宽度方向间距为7 mm,中间方框内95个作动器为有效作动器,四周作动器对镜面起支撑作用。图16(a)是应力仿真结果,图(b)是应变仿真结果,图(c)是流场仿真结果,从图上可以看出应变为2.78 μm,应力为18.42 MPa,满足应用需求;通过流场

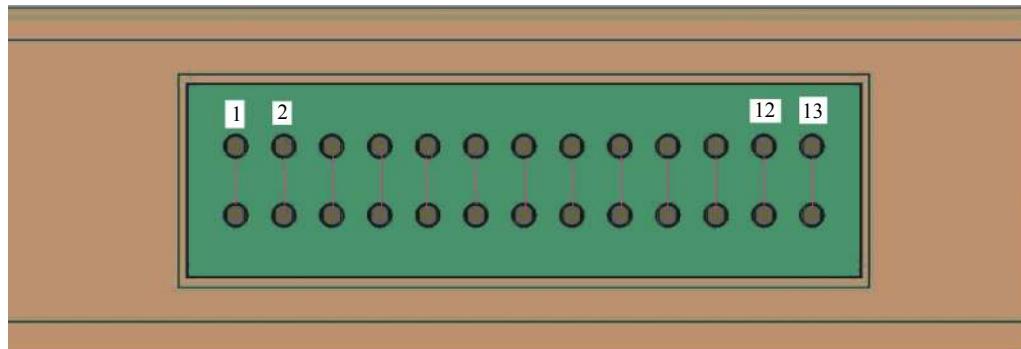


图12 一维变形镜外形图

Fig.12 The outline drawing of 1D DM

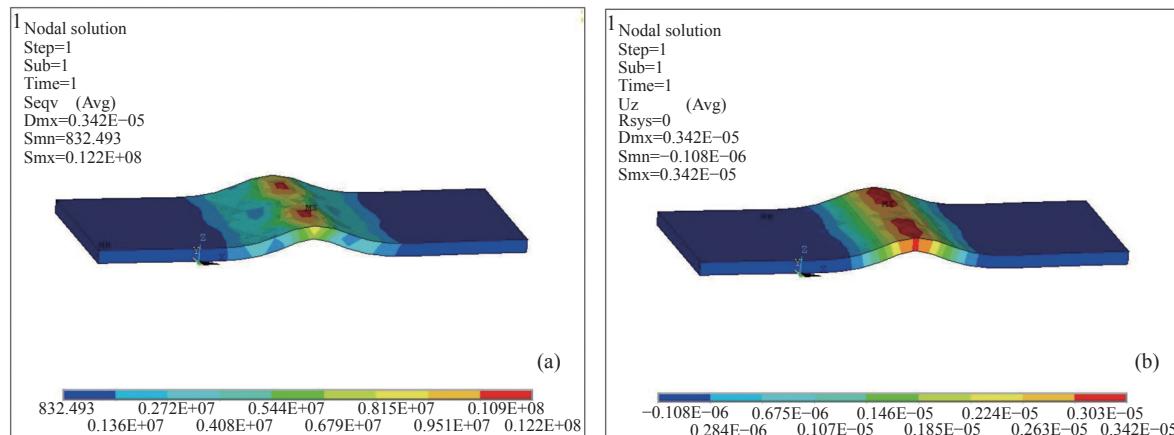


图13 (a) 一维变形镜仿真时的应力;(b) 应变

Fig.13 (a) Stress in simulation of 1D DM; (b) Strain

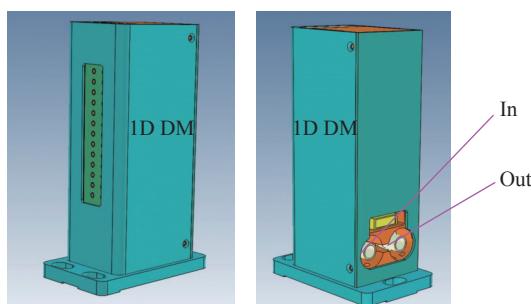


图14 一维变形镜外形图

Fig.14 The outline drawing of 1D DM

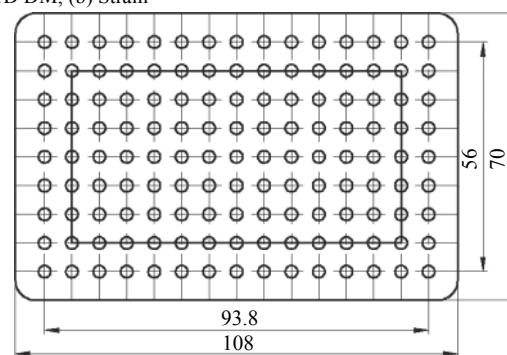


图15 95 单元变形镜作动器排布方式

Fig.15 Actuator arrangement of DM of 95 units

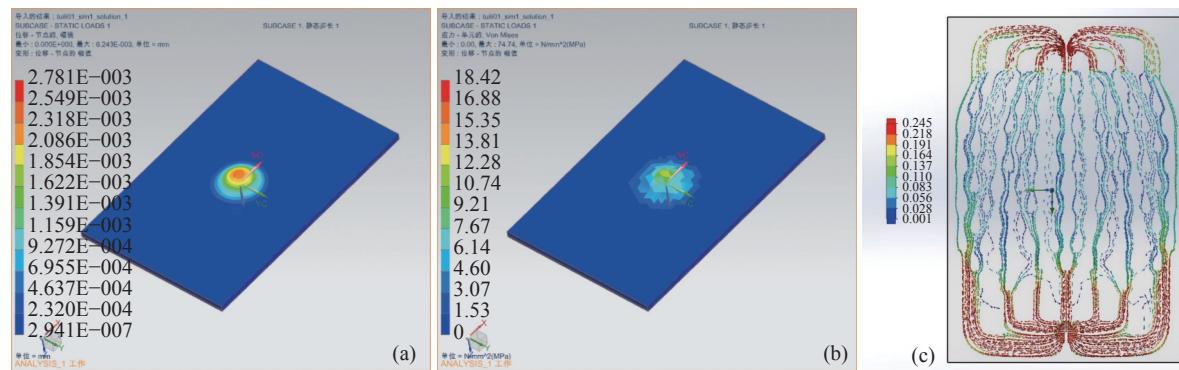


图 16 (a) 应力; (b) 应变; (c) 流场分布  
Fig.16 (a) Stress; (b) Strain; (c) Flow field distribution

仿真, 可优化冷却水的分布情况, 确保对镜片均匀冷却。

图 17 为铰链值仿真结果, 其值为 33.5%。

通过仿真计算, 可以为二维变形镜的结构优化设计提供帮助, 同时, 也可以初步评估变形镜的相关参数是否满足使用要求。结合仿真结果开展结构优化设计, 通过几轮迭代后设计的 95 单元变形镜外形如图 18 所示。随后开展加工装调及镀膜等工艺流程, 完成硬件研制。

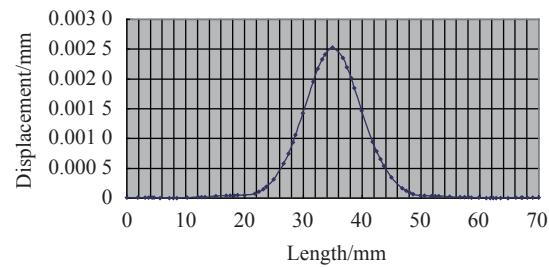


图 17 铰链值仿真结果 (铰链值 33.5%)

Fig.17 Simulation results when the hinge value is 33.5%

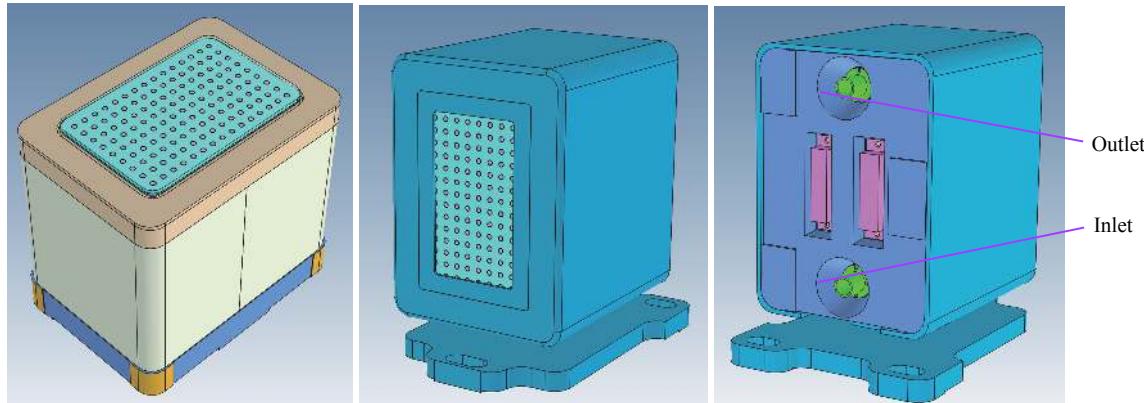


图 18 95 单元变形镜外形图  
Fig.18 The outline drawing of DM of unit 95 units

#### 4 变形镜性能测试

变形镜研制过程中部分性能参数即已定型, 包括动态范围和铰链值以及冷却水对面形的影响等, 静态面形和热致形变需在镀膜后进行测试。图 19 为变形镜性能测试照片, 图 (a) 为二维变形镜性能测试现场, 图 (b) 为一维变形镜测试现场。

图 20(a) 为二维变形镜第 45 通道的响应测试结果, 图 (b) 为铰链值测试结果, 图 (c) 为镀膜后的静态面形, 从图中可以看出, 单作动器响应为  $2.79 \mu\text{m}$ , 铰链值为 32% 左右, 与仿真结果相当; 镀膜后的静态面

形为  $0.051 \mu\text{m}@RMS$ 。图 21 为测试水压对变形镜面形的影响, 图 (a) 为水压测试照片, 图 (b) 为冷却水流动时变形镜面形变化量, 图 (c) 为堵住出水口后的面形变化量, 从测试结果来看, 水流动过程中或堵住出水口, 水压造成的面形变化量都很小, 且为低阶像差, 通过变形镜校正后, 其光束质量基本不受影响。

图 22 为一维变形镜性能指标测试结果。正中间的第 6 通道响应为  $3.91 \mu\text{m}$ , 与仿真结果基本相符; 镀膜后静态面形基本能维持在  $0.055 \mu\text{m}@RMS$ 。

一维变形镜和二维变形镜均需承受激光器较高

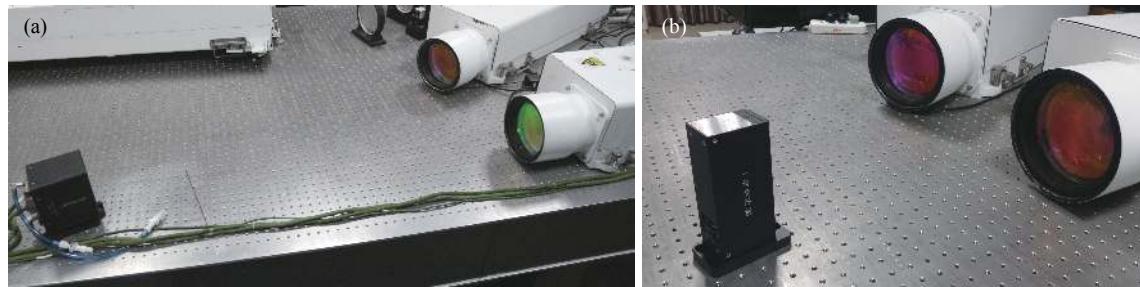


图 19 2D 和 1D 变形镜的测试照片

Fig.19 The test platform of 2D and 1D DMs

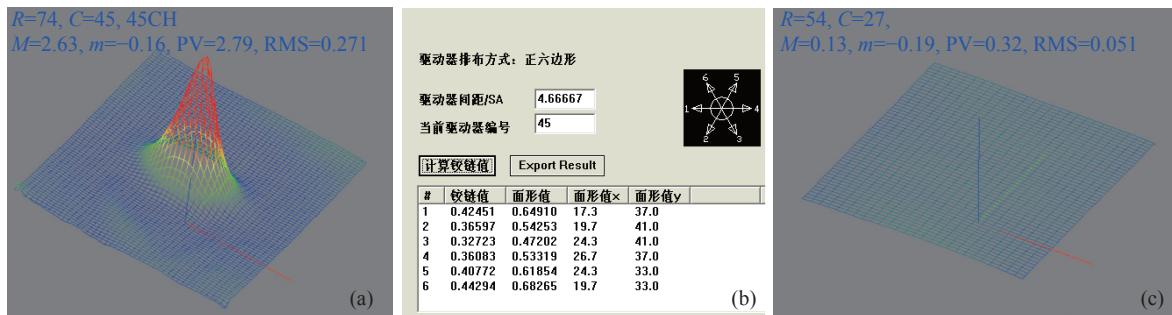


图 20 (a) 二维变形镜响应; (b) 铰链值; (c) 静态面形

Fig.20 (a) Response of 2D DM; (b) The hinge value; (c) Static surface shape

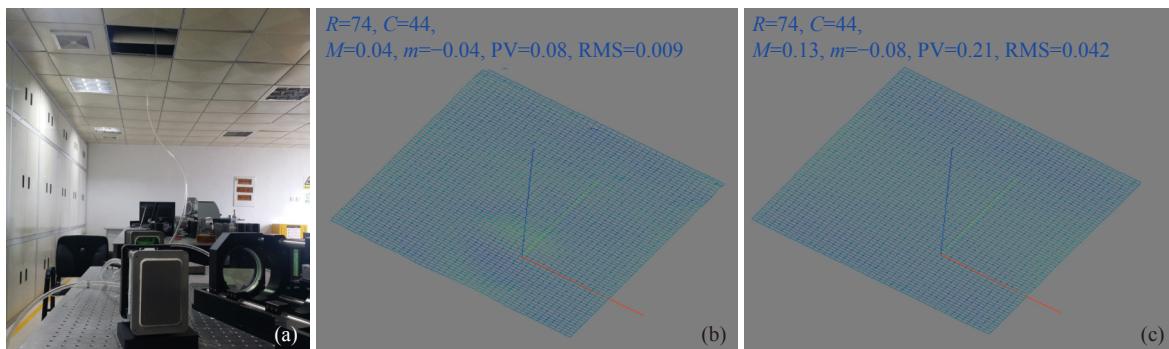


图 21 (a) 水压试验; (b) 水流动过程中面形变化量; (c) 堵住出水口面形变化量

Fig.21 (a) Hydrostatic test; (b) Surface deformation during water flowing; (c) The change of surface shape during water outlet plugging up

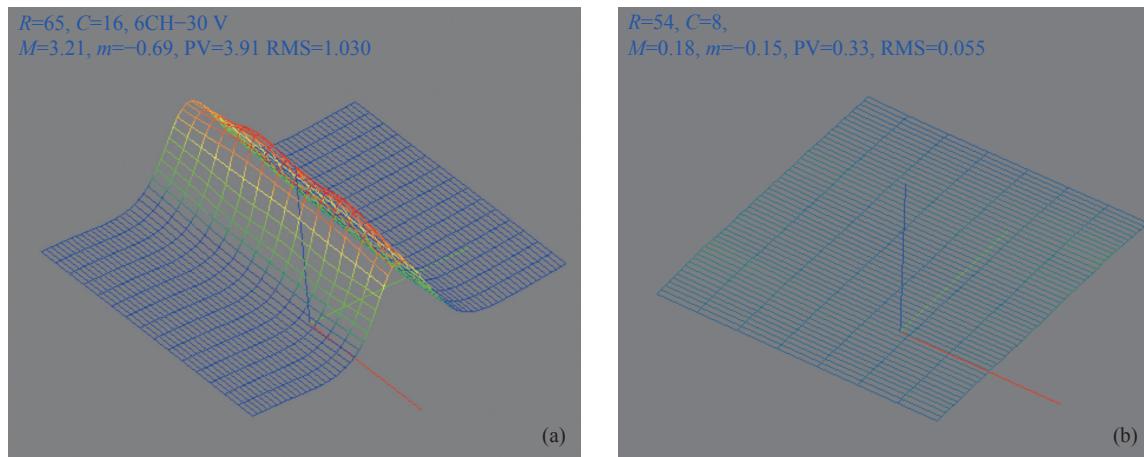


图 22 (a) 一维变形镜第 6 通道响应测试结果; (b) 静态面形

Fig.22 (a) Test response results of channel 6 of 1D DM; (b) Static surface shape

功率密度的照射,强光照射下面形的稳定性关系到光束质量的校正效果,为此采用内循环冷却装置对一二维变形镜进行主动冷却,冷却水依次流经一维变形镜、二维变形镜以及热交换器,镜面产生的热量由冷却水带到热交换器中,热交换器通过微通道散热结构将热量传导给外循环冷却液,降低内循环冷却水的温度,从而对变形镜进行主动冷却,内外冷却液互不相通,可确保内循环水压保存相对稳定,温度可控。实

验前对内循环装置的冷却能力进行了测试,图 23(a)为内循环冷却装置,图(b)为按照图 1 光路摆放并在强光照射下的综合波前畸变量,从图上可以看出,其热致波前畸变仅为  $0.11 \mu\text{m}@RMS$ ,且基本上都是低阶像差,在变形镜动态范围内,这种热致形变产生的像差是很容易被校正掉的。图 24 为一维变形镜和二维变形镜实物。

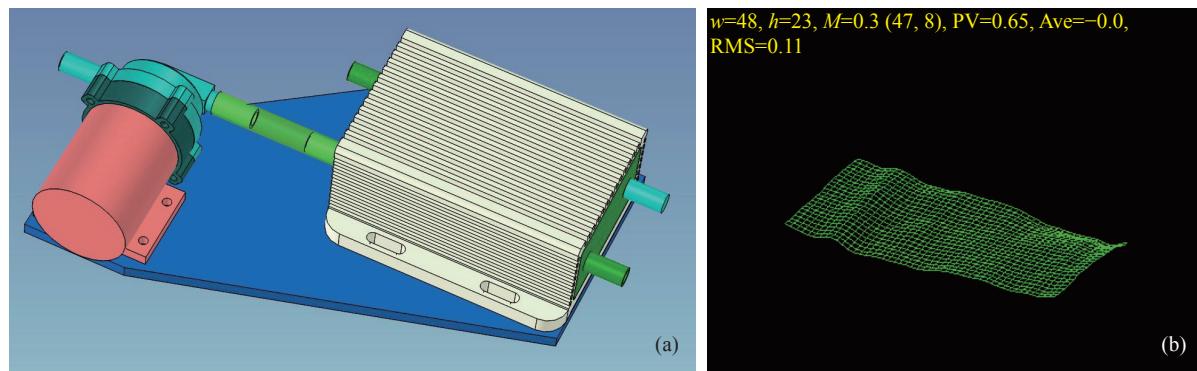


图 23 (a) 内循环冷却装置;(b) 强光照射下面形变化量

Fig.23 (a) Internal circulation cooling device; (b) The change of surface shape under the high power laser irradiation



图 24 一二维变形镜实物

Fig.24 The picture of 1D and 2D DMs

## 5 双变形镜对 Yb:YAG 激光器光束质量校正实验

在 Yb:YAG 板条激光器光束质量校正实验中(光路见如图 1 所示),哈特曼测试分光镜前段激光器的综合像差并对像差进行高速处理,随后进行波前重构,将控制量发送给高压驱动器,并施加到作动器上,使变形镜产生与波前畸变共轭的面形,从而对波前畸

变进行相位补偿以达到校正光束质量的目的。闭环校正前,需测试一二维变形镜均处于开环状态时激光器输出的波前畸变,用一维变形镜的电压响应矩阵进行理论校正光斑长度方向上的波前畸变,当波前畸变校正到最佳状态时,记录一维变形镜每个单元的驱动电压,闭环校正时,提前加载该电压到一维变形镜上,哈特曼探测的剩余像差交给二维变形镜进行闭环校正。图 25 和图 26 为激光器输出的实际像差,采用一二维变形镜进行理论校正后再开展实际校正,这是闭环校正前必须进行的操作过程,其目的一方面记录一维变形镜每个驱动器的电压,另一方面也可避免波前重构过程中出现过失导致校正失效。图 25(a)为原始波前,图 (b) 为一维变形镜理论校正效果,图 (c) 为一维变形镜实际校正效果,剩余残差由二维变形镜进行校正,图 26(a) 为二维变形镜理论校正效果,图 (b) 为二维变形镜实际校正效果;不难发现,理论校正结果与实际校正结果相差较小,这跟变形镜的响应带宽、波前探测器的精度、波前重构的精度以及速度等诸多方面都有极大的关联性。

图 27 和图 28 为典型的 Yb:YAG 激光器在自适

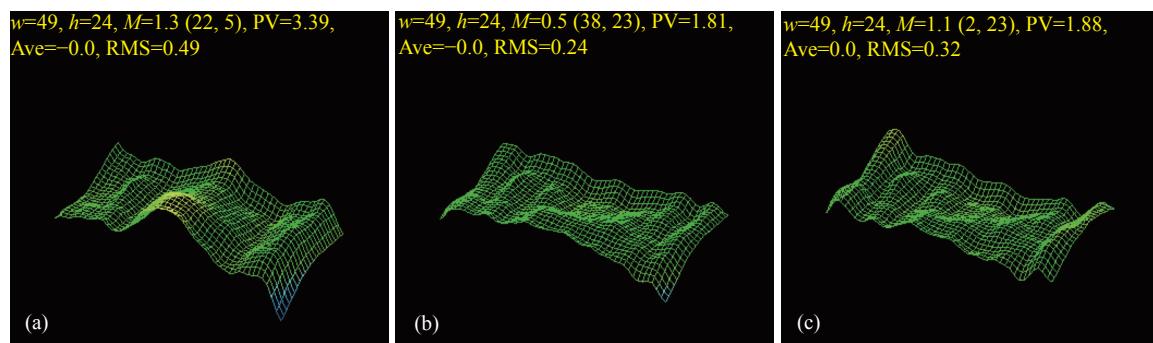


图 25 (a) 原始波前; (b) 一维变形镜理论校正结果; (c) 一维变形镜实际校正结果

Fig.25 (a) Primitive wavefront; (b) The theoretical adjust result by 1D DM; (c) The actual adjust result by 1D DM

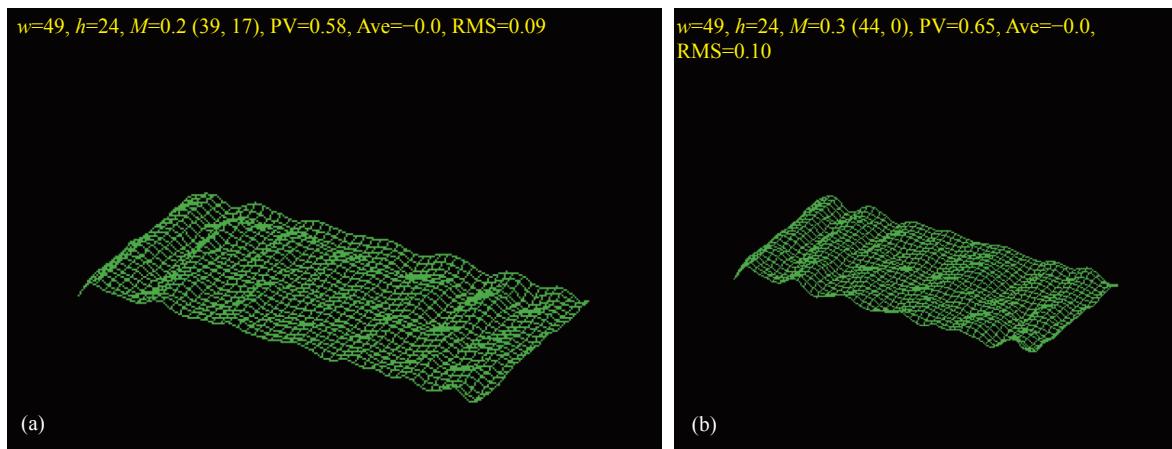


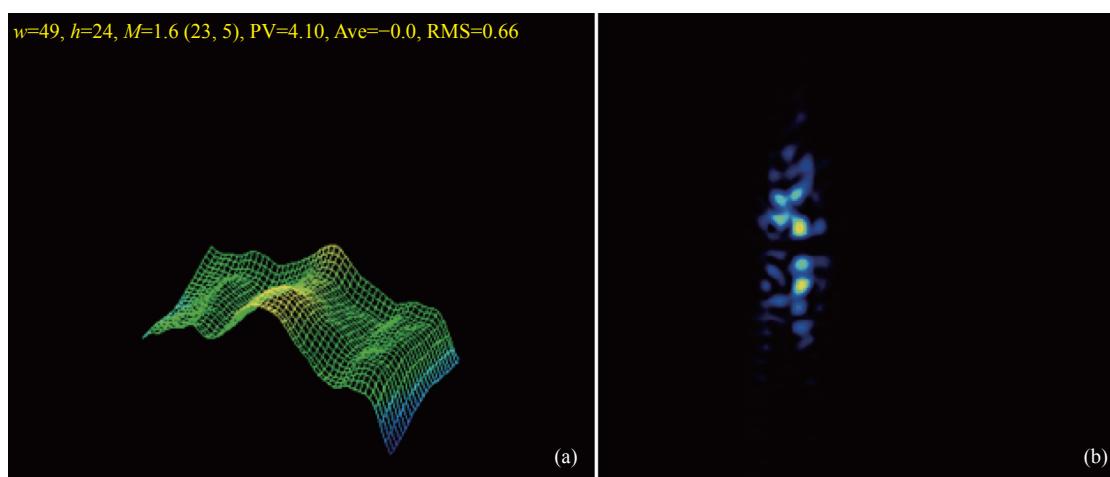
图 26 (a) 二维变形镜理论校正结果; (b) 二维变形镜实际校正结果

Fig.26 (a) The theoretical adjust result by 2D DM; (b) The actual adjust result by 2D DM

应光学系统开环和闭环情况下的测试结果。图 27(a)为开环原始波面, 图 (b)为开环远场光斑, 图 (c)为闭环波面, 图 (d)为闭环远场光斑; 图 28(a)为开闭环光束质量测试曲线, 图 28(b)为闭环光束质量测试曲线。开环时, 波前畸变 PV 值为  $4.10 \mu\text{m}$ , 均方根为  $0.66 \mu\text{m}$ , 光束质量  $\beta=9.03$ , 闭环后, 波前畸变 PV 值为  $0.56 \mu\text{m}$ ,

均方根为  $0.07 \mu\text{m}$ , 光束质量提升至  $\beta=1.98$ 。

该实验中光斑形态为方形光束, 其光束质量以理想方形束平面波为参考光束, 实际光束远场发散角与衍射极限发散角的比来定义。光束质量测量时, 实际远场发散角区域用衍射极限矩形等比放大来套取功率, 直到矩形区域内含功率比等于方形衍射极限内含



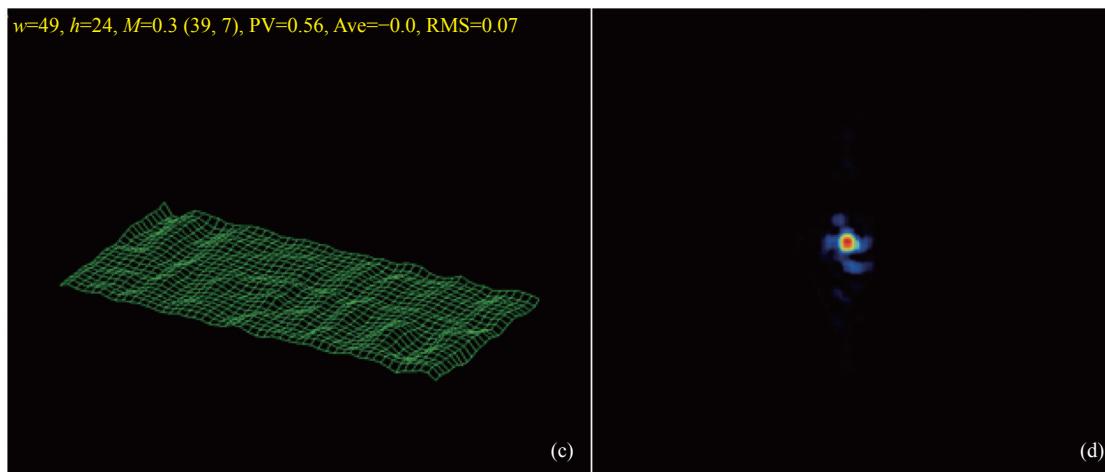


图 27 (a) 开环波面; (b) 开环远场光斑; (c) 闭环波面; (d) 闭环远场光斑

Fig.27 (a) The open-loop wavefront; (b) The open-loop far field spots; (c) The close-loop wavefront; (d) The close -loop far field spots

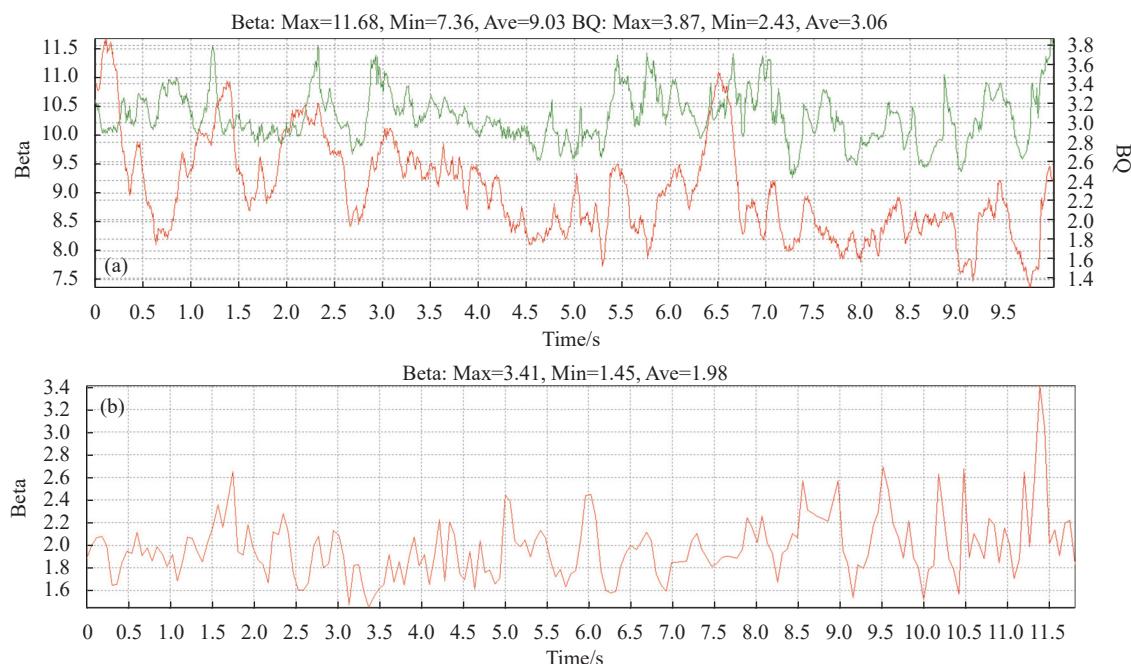


图 28 (a) 开环光束质量测试曲线; (b) 闭环光束质量测试曲线

Fig.28 (a) Test curve of the open-loop beam quality; (b) Test curve of the closed-loop beam quality

功率比, 此时, 衍射极限矩形倍数即为光束质量。图 28 中, 光束质量的测试曲线上下波动, 且有的波动相对较大, 主要是由于激光器输出的光束均匀性欠佳, 光强随时间变化较快, 即时空变化频率较高, 而自适应光学系统的闭环带宽尚未达到完全抑制上述情况时, 随即产生波动, 后续将通过优化 PID 参数设置、提高探测频率和处理速度, 即提高系统闭环带宽, 可以使光束质量的曲线趋于平缓。

## 6 结 论

文中对 Yb:YAG 激光器的波前特性和变形镜作动器的排布方式及校正能力进行了分析, 在仿真基础上开展了一维变形镜和二维变形镜的结构优化设计, 最后对研制的变形镜各项指标进行了测试, 相关指标与仿真结果基本吻合。采用一维变形镜和二维变形镜相结合的双变形镜模式开展了激光器光束质量校正实验, 将激光器开环时的波前畸变均方根提高了

9.4 倍, 其光束质量从  $\beta=9.03$  提高到  $\beta=1.98$ , 验证了双变形镜组合模式的自适应光学系统对 Yb:YAG 板条激光器光束质量校正的能力, 同时也提高了激光器输出的能量集中度。

### 参考文献:

- [1] Li M, Zhou T J, Xu L, et al. Theoretical design and experimental research on high power Yb: YAG ceramic slab laser amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0114001. (in Chinese)
- [2] Gao Q S, Zhou T J, Shang J L, et al. High efficiency and compact Yb: YAG slab all-solid-state laser at room temperature [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(12): 121009. (in Chinese)
- [3] Li M, Shang J L, Zhou T J, et al. Theoretical research on zero-phonon line pumped Yb: YAG Slab amplifier at room-temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0214003. (in Chinese)
- [4] Ma Y F, Shen Y J, Xu L, et al. Dual-wavelength amplification properties of continuous-operation Yb: YAG slab laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0101006. (in Chinese)
- [5] Yan R P, Yu X, Li X D, et al. High Power continuous-wave and cavity-dumped Yb: YAG thin disk lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0701004. (in Chinese)
- [6] Sueda K, Takahashi H, Kawato S, et al. High-efficiency laser-diodes-pumped microthickness Yb:  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  slab laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(15): 151110.
- [7] Matsubara S, Ueda T, Takamido T, et al. Nearly quantum-efficiency limited oscillation of Yb: YAG laser at room temperature[C]/Conference on Lasers and Electro-optics, 2005: 325-327.
- [8] Xie SH Y, Wang J W, Shun Y, et al. VCSEL end-pumped high-energy Q-switched Nd: YAG laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(3): 558-564. (in Chinese)
- [9] Yang C H, Gu C H L, Liu Y, et al. Dual repetition-rate mode-locked Yb: YAG ceramic laser [J]. *Acta Phys Sin*, 2018, 67(9): 094206. (in Chinese)
- [10] Duan J L, Xu Dong, Wu W T, et al. Lin Sen Research on LD pumped 1.06 $\mu\text{m}$  burst-mode laser and the amplification systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0105003. (in Chinese)
- [11] Cao M ZH, Liu X SH, He H, et al. Theoretical and experimental study on Nd: YAG Q-switched laser instability phenomenon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1105005. (in Chinese)
- [12] Li J ZH, Chen ZH Q, Zhu S Q. High-peak-power and short-pulse laser with a Yb: YAG/Cr<sup>4+</sup>: YAG/YAG composite crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0606007. (in Chinese)
- [13] Dai Q, Zhang S CH, Yang F, et al. Research on the high beam quality of Gaussian unstable resonators in solid state lasers [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 559-566. (in Chinese)
- [14] Yu Y, Zhu J F, Li J, et al. High power passively Q-switched laser of diode-pumped domestic Yb: YAG ceramic [J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(10): 1001007. (in Chinese)
- [15] Ma S Q, Yang P, Lai B H, et al. Slab laser beam cleanup based on efficient stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Optical Technique*, 2021, 47(8): 0805001. (in Chinese)
- [16] Xu F, CH X J, Li CH. Research on the thermal effect of Yb: YAG lasers with active-mirror structure [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2019, 40(3): 347-350. (in Chinese)
- [17] Jiang X Y, Zheng J G, Yan X W, et al. Structural design of the water cooling system in a high power end cooled Yb: YAG slab laser [J]. *Laser Technol*, 2011, 35(5): 629-631. (in Chinese)
- [18] Ji L T, Zou Y, Li T ZH, et al. Improvement of gain medium thermal effect in Nd: YAG grazing incidence slab laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1101005. (in Chinese)
- [19] Peng Q J, Xu Z Y. Relationship between beam quality and power for solid state laser with high average power [J]. *High Power Lasers and Particle Beams*, 2011, 33(5): 629-631. (in Chinese)
- [20] Li P L, Liu Q, Fu X, et al. Large-aperture end-pumped Nd: YAG thin-disk laser directly cooled by liquid [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(4): 041408.
- [21] Dong L ZH, Xu B, Yang P, et al. Recent progress of adaptive beam cleanup of solid-state slab lasers in Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170539. (in Chinese)
- [22] Wang J T, Tong L X, Xu L, et al. 5 kW end-pumped Nd: YAG slab lasers and beam quality improvement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0101003.
- [23] Yan Y F, Yu Y, Bai S P, et al. Progress on beam quality control technology of slab lasers [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 767-782. (in Chinese)
- [24] Li G H, Lu F, Xu H L, et al. Research on the one-dimension deformable mirror with active cooling system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 0602007. (in Chinese)
- [25] Li G H, Xiang R J, Wu J, et al. Water-cooled defocus-correction deformable mirror [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29(8): 081001. (in Chinese)
- [26] Xiang R J, Du Y L, Xu H L, et al. Phase aberration correcting of a slab MOPA solid state laser with combined deformable mirrors [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(7): 071009. (in Chinese)