

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0420

矩形水冷压电变形镜的制备与表征

姚琪, 罗帆, 俞历程, 马剑强*

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对板条激光器射出激光束畸变问题, 提出了一种边缘驱动的矩形水冷压电变形镜。首先建立有限元模型对变形镜校正性能和热性能进行仿真, 结果显示在功率为 10 kW 的激光照射下加载冷却条件, 变形镜镜面温度降至 45 °C, 冷却效果显著; 然后通过实验成功制备了 60 单元 20 mm×4 mm 口径的变形镜样机, 搭建了基于 Shack-Hartman 传感器的自适应光学测试系统, 并对变形镜典型致动器影响函数、校正性能、频率响应特性进行了表征。测试结果显示: 变形镜典型致动器在 100 V 电压驱动下的变形量为 1.0~1.5 μm , 能够较准确重构低阶正弦函数面形, 一阶固有频率约为 650 Hz。该矩形水冷压电变形镜具备一定的校正能力, 在低成本板条激光器校正领域具有一定的应用前景。

关键词: 自适应光学; 水冷; 压电变形镜; 板条激光器

中图分类号: TN384; O438

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 04-0014-05

自适应光学可实时补偿相位的畸变, 得到接近光学系统衍射极限的分辨率^[1-2]。在天文^[3]、激光加工^[4]、视网膜成像^[5]和生物显微镜^[6]等领域应用广泛。自适应光学系统一般由波前控制器、波前传感器和波前校正器(变形镜)等构成, 变形镜是自适应光学系统中的核心元件, 其性能好坏直接决定整个系统的校正能力。

板条激光器是激光工作物质为板条的固体激光器, 在激光加工、粒子成像测速、光通信等领域有着较普遍的应用^[7]。随着板条激光器功率的增加, 使得激光器在工作时内部温度分布不均匀, 射出的矩形状激光束质量急剧降低。水冷变形镜通过加载冷却条件, 可对光束中由于热效应引起的像差进行校正^[8]。

李国会等^[9]提出的主动冷却式一维变形镜, 有效校正口径较大, 且能承受激光器满功率出光, 性能优异, 校正动态范围不小于 5 μm , 镜面在 8 kW·cm⁻² 功率密度激光照射下温升小于 1 °C, 但存在压电陶瓷柱驱动成本较高、致动器数目较少的问题。

Zhang 等^[10]提出的新型 19 单元水冷变形镜, 将温升从 30.3 °C 降至 27.1 °C, 冷却效果较好, 但选用压电陶瓷叠堆成本较高。Safronov 等^[11]提出的在弹性层硅基座中加入冷却通道, 提高了冷却效率, 但实际布置时变形镜结构较为复杂, 且对镜面的初始面型有一定影响。Lee 等^[12]和 Samarkin 等^[13]提出的水冷变形镜在镜面外圈对变形镜进行冷却, 但这种方式会使镜面沿径向产生温度梯度变化, 冷却效率较低。

本文提出了一种成本低、驱动电压低、结构简单的边缘驱动矩形水冷压电变形镜, 在有限元仿真基础上成功制备了 60 单元的变形镜样机, 搭建了自适应光学测试平台对变形镜的性能进行了表征, 结果良好。该矩形水冷变形镜在低成本板条激光校正领域有良好的应用前景。

1 结构原理

矩形水冷压电变形镜的原理结构如图 1 所示, 该变形镜由长条状环形的压电陶瓷片和长条状的

收稿日期: 2023-04-19.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51805280)。

第一作者: 姚琪(1998-), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 压电变形镜的设计与制备。E-mail: 523078757@qq.com

*通信作者: 马剑强(1983-), 男, 浙江台州人, 副教授, 主要研究方向: 压电器件、变形镜和自适应光学。E-mail: majianqiang@nbu.edu.cn

硅片粘接而成, 硅片单面抛光并作为反射层, 压电陶瓷片两面均覆有银电极, 其中一面银电极图形画出线性阵列的电极图案作为致动器, 分为两环, 共 60 个电极, 均排布在有效通光口径之外. 变形镜的水冷腔体布置在变形镜的背部, 冷却液与镜面直接接触, 变形镜致动器布置在变形镜正面, 从而实现了冷却液与电气连接的物理分离. 根据逆压电效应, 给单个致动器施加电压时会产生弯曲变形, 当多个致动器共同作用时, 通过合适的算法, 能够使镜面产生与波前畸变共轭的面形, 实现对矩形光束波前畸变的校正.

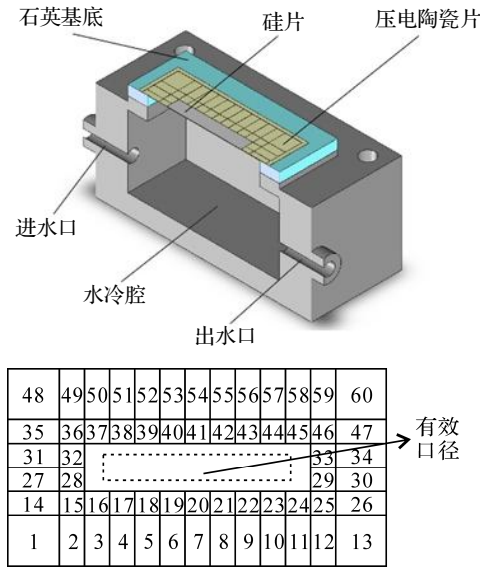


图1 水冷变形镜截面正等轴测图及电极排布

2 仿真分析

2.1 校正能力仿真

使用 ANSYS 软件辅助变形镜的设计, 为后续实物制备提供指导. 该变形镜选用的压电陶瓷片(苏州攀特电陶股份科技有限公司)厚 100 μm , 硅片(苏州晶硅科技有限公司)厚 200 μm . 有限元仿真分析各材料参数见表 1.

在建立变形镜有限元仿真模型时, 使用 Solid45 (一阶 8 个节点的结构单元)作为硅层的求解单元, 使用 Solid5(一阶 8 个节点的压电结构耦合单元)作为压电陶瓷层的求解单元, 采用自由划分网格的方式进行分析. 由于粘接层和电极层相对于硅层和压电陶瓷层的厚度较小, 故在仿真时可忽略不计. 在经过定义材料、建立模型、划分网格、边界

固支条件和电压加载求解后, 得到了变形镜各个致动器的影响函数. 每个致动器的性能均对变形镜整体校正性能有很大的影响, 在 100 V 电压下仿真得到的变形镜典型致动器影响函数如图 2 所示. 该变形镜的有效口径为 20 mm $\times$ 4 mm, 43 号和 56 号致动器在有效口径内变形量的峰谷值(N_{PV})分别为 1.64 μm 和 1.19 μm .

表 1 变形镜仿真材料性能参数

参数	硅片	压电陶瓷
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 330	7 500
杨氏模量/GPa	190	68
泊松比	0.3	0.3
压电常数/($\text{pm}\cdot\text{V}^{-1}$)		-400
比热容/($\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$)	733	320
热导率/($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)	173.6	1.4
热膨胀系数/ K^{-1}	2.3×10^{-6}	1.9×10^{-6}

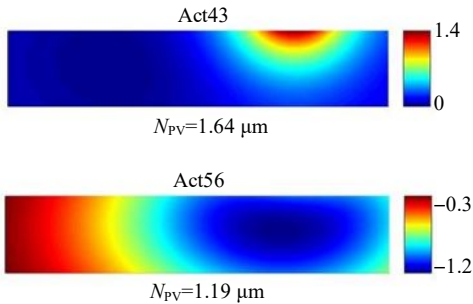


图2 仿真典型致动器影响函数(单位: μm)

在得到变形镜的影响函数后, 仿真镜面重构低阶正弦函数面形的能力, 并依次计算面形的峰谷值和均方根(N_{RMS}). 残余误差为理论面形与实验面形之差, 残余误差的均方根值表示为 N_{ERR} . 重构的正弦函数面形如图 3 所示.

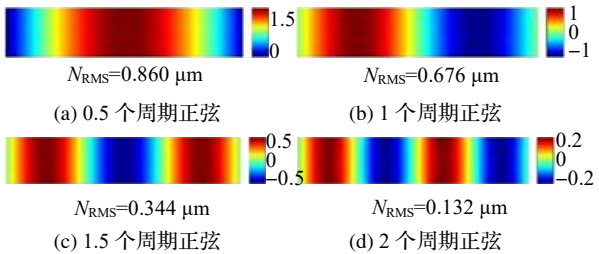


图3 仿真重构低阶正弦函数面形(单位: μm)

随着重构正弦函数周期的增加, 变形镜重构幅值逐渐减小, 归一化波前残余误差(N_{ERR} 与 N_{RMS} 值之比)逐渐增大. 0.5 个周期正弦函数面形的 N_{PV}

值约为 $1.50\text{ }\mu\text{m}$, 归一化波前残余误差为 0.5% ; 1 个周期正弦函数面形的 N_{PV} 值约为 $2.05\text{ }\mu\text{m}$, 归一化波前残余误差为 0.6% ; 1.5 个周期正弦函数面形的 N_{PV} 值约为 $1.10\text{ }\mu\text{m}$, 归一化波前残余误差为 1.1% ; 2 个周期正弦函数面形的 N_{PV} 值约为 $0.38\text{ }\mu\text{m}$, 归一化波前残余误差为 2.5% . 仿真结果表明, 该变形镜具备一定重构能力.

2.2 热仿真

镜面在激光校正中存在热沉积现象, 产生的热应力将导致镜面发生热变形, 使变形镜的校正精度下降, 存在潜在的失效风险. 本文设计的变形镜期望应用于高能激光场合下的板条激光器波前畸变校正, 故进行热仿真分析十分必要. 仿真设置了口径为 $20\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 的平顶激光光束入射在变形镜的反射层, 激光功率设置为 10 kW , 硅片的反射率设置为 99.9% [10]. 硅片的热导率为 $173.6\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$, 压电陶瓷的热导率为 $1.4\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$. 变形镜与空气的导热系数设为 $8\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$, 冷却液与硅片的导热系数设为 $1000\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$. 变形镜材料热物理性能参数见表 1, 环境温度保持为 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 热响应仿真结果如图 4 所示, 镜面温度分布如图 5 所示.

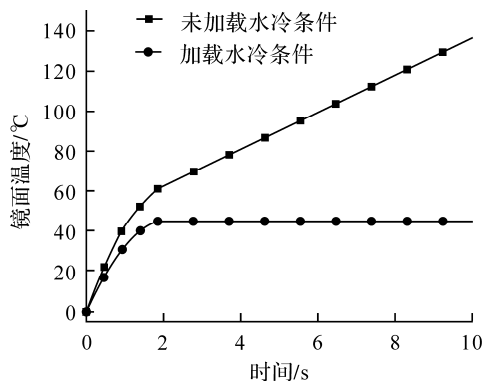


图 4 热响应曲线

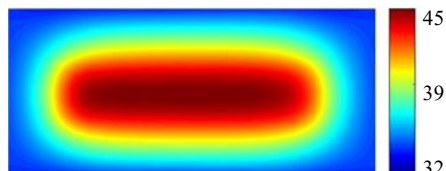


图 5 加热到 5 s 时镜面温度分布(单位: $^\circ\text{C}$)

在未加载冷却条件下, 变形镜镜面温度在 5 s 时达到约 $83\text{ }^\circ\text{C}$, 并持续升高; 在加载冷却条件下, 变形镜在 1.9 s 内达到热平衡, 且最高温度约为

$45\text{ }^\circ\text{C}$. 对比可知, 该变形镜冷却效果显著.

3 样机制备

使用激光打标机将厚 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的压电陶瓷片切割成外环 $45.5\text{ mm}\times 28\text{ mm}$, 内环 $22.5\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的环状矩形, 两面均有银电极层, 且一面为图形化电极阵列; 硅片尺寸为 $45.5\text{ mm}\times 28\text{ mm}$, 厚为 $200\text{ }\mu\text{m}$, 单面抛光. 硅片表面未镀膜, 后续可根据具体应用场合决定是否镀膜. 通过环氧胶将硅片与压电陶瓷片粘接起来, 待固化后再与石英玻璃基底粘接, 整个固化过程在 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温箱中进行. 通过漆包线引出电极并焊接在电路板上, 电极与漆包线接触处涂抹适量导电银浆, 保证良好的导通性. 最后在完成电气部分的连接后进行变形镜整体的封装. 制备的 60 单元边缘驱动线性阵列水冷压电变形镜如图 6 所示. 由于实际制备过程中不可避免产生溢胶现象, 故选取中心 $20\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 部分作为有效校正口径. 该变形镜制备工艺相对简单, 所需材料均为通用材料, 其成本远低于其他同类型的矩形变形镜.

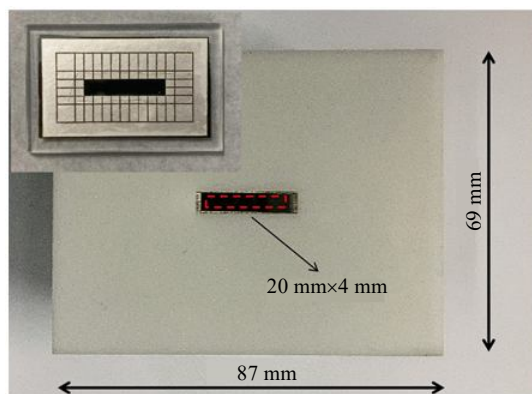
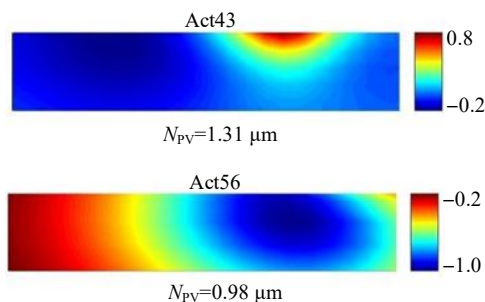


图 6 变形镜样机

4 性能表征

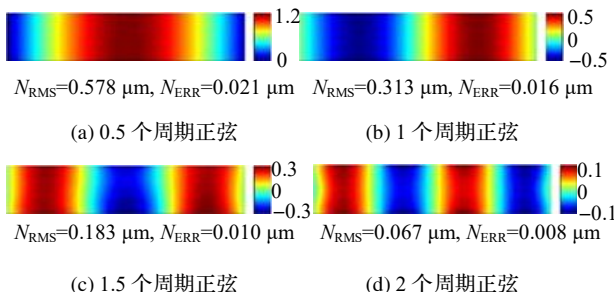
4.1 影响函数

为了测试矩形水冷压电变形镜的校正能力, 搭建了基于 Shack-Hartman 波前传感器(Thorlabs WFS150-7AR)的自适应光学系统. 该波前传感器使用 17×17 微透镜阵列(图 7), 在加载 100 V 电压下变形镜 43 号和 56 号致动器的 N_{PV} 值分别为 $1.31\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.98\text{ }\mu\text{m}$, 且变形行为、变形量与仿真结果基本一致.

图7 实测典型致动器影响函数(单位: μm)

4.2 重构

为了验证变形镜的校正性能, 实验重构了低阶正弦函数面形, 重构的正弦函数面形如图8所示.

图8 重构的低阶正弦函数面形(单位: μm)

0.5个周期正弦函数面形的 N_{PV} 值约为 $1.20\ \mu\text{m}$, 归一化波前残余误差为 3.6% ; 1个周期正弦函数面形的 N_{PV} 值约为 $1.30\ \mu\text{m}$, 归一化波前残余误差为 5.0% ; 1.5个周期正弦函数面形的 N_{PV} 值约为 $0.76\ \mu\text{m}$, 归一化波前残余误差为 10.9% ; 2个周期正弦函数面形的 N_{PV} 值约为 $0.20\ \mu\text{m}$, 归一化波前残余误差为 12.3% . 实验结果与仿真结果基本一致, 表明该变形镜具备一定的校正能力, 但该变形镜尚不能精确重构更高阶的正弦函数面形. 后续将通过优化制备工艺、增加变形镜电极数目或改变电极排布等方式, 使变形镜能够重构高阶的面形, 并获得更高的精度.

4.3 频率响应特性

实验使用 SOPTOP-LV-S01 激光多普勒测振仪 (宁波舜宇光学科技有限公司) 测试水冷变形镜整体的谐振频率, 通过信号发生器给致动器第7号施加 $5\ \text{V}$ 的激励电压, 扫频信号为正弦信号, 扫频范围从 $300\ \text{Hz}$ 至 $1500\ \text{Hz}$. 水冷压电变形镜镜面中心位置在激励电压下的响应如图9所示. 从图9可知, 在低频区间内响应曲线较为平稳, 2个共振峰分别出现在 $650\ \text{Hz}$ 和 $760\ \text{Hz}$ 处. 实验结果显示该变形

镜具有良好的二阶固有频率, 能够满足大部分实际应用场合.

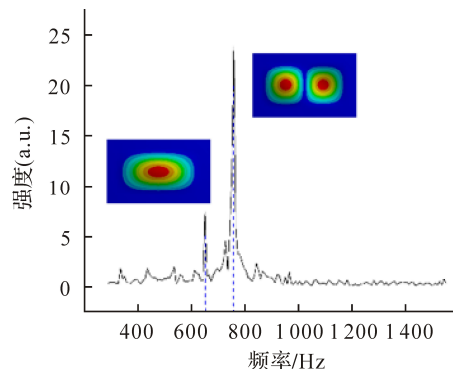


图9 变形镜频率响应特性

5 结语

针对高能场合板条激光器射出矩形激光束波前畸变的问题, 提出了一种边缘驱动的矩形水冷压电变形镜. 与传统的矩形水冷压电变形镜相比, 该变形镜具有价格低、驱动电压低、工艺简单等特点. 其独特的正面光束校正、背面连接水冷腔的结构设计, 实现了冷却液与电气部分的分离, 解决了激光系统中水冷部分布置困难的问题, 使变形镜工作时更加稳定可靠. 仿真变形镜的镜面在加载冷却条件下最高温度维持在 $45\ ^\circ\text{C}$. 实验成功制备了 60 单元变形镜样机, 搭建了一种基于 Shack-Hartman 波前传感器的自适应光学测试系统, 对变形镜的校正性能进行了表征. 实验结果表明, 该变形镜单个致动器在 $100\ \text{V}$ 电压下的波前变形量为 $1.0\sim 1.5\ \mu\text{m}$, 能较准确地重构低阶正弦函数面形, 一阶固有频率约为 $650\ \text{Hz}$. 表明该变形镜性能良好, 有望应用于低成本板条激光器光束校正领域.

参考文献:

- [1] 姜文汉. 自适应光学技术[J]. 自然杂志, 2006, 28(1): 7-13.
- [2] Rausch P, Verpoort S, Wittrock U. Unimorph deformable mirror for space telescopes: Design and manufacturing[J]. Optics Express, 2015, 23(15):19469-19477.
- [3] Li M, Zhang A, Zhang J B, et al. Wide-field telescope alignment using the model-based method combined with the stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Photonics, 2021, 8(11):463.
- [4] 何杰铃. 基于自适应光学的激光束整形系统研究[D].

- 成都: 中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2016.
- [5] Li H, Lu J, Shi G H, et al. Real-time blind deconvolution of retinal images in adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(13): 3258-3263.
- [6] 于磊. 视网膜自适应光学成像质量的改进研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2015.
- [7] 唐晓军, 王钢, 刘娇, 等. 高亮度固体激光器技术发展研究[J]. *中国工程科学*, 2020, 22(3):49-55.
- [8] Wang K X, Fu S Y, Zhang K X, et al. Thermal effects of the zig-zag Yb: YAG slab laser with composite crystals[J]. *Applied Physics B*, 2021, 127(8):121.
- [9] 李国会, 卢飞, 徐宏来, 等. 主动冷却式一维变形镜技术研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(6):54-59.
- [10] Zhang Y P, Long G Y, Zhang X Y, et al. Finite-element-method study of a new type water cooling deformable mirror[C]//Proc SPIE 11455, Sixth Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Applications, 2020, 11455:862-869.
- [11] Safronov A G, Vinevitch B S, Zharikov V M. Controllable curvature mirrors for laser techniques[C]//Proc SPIE 3686, Laser Optics'98: Gas, Liquid, and Free-electron Lasers, 1999:16-25.
- [12] Lee J H, Lee Y C, Kang E C. A cooled deformable bimorph mirror for a high power laser[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2006, 10(2):57-62.
- [13] Samarkin V, Aleksandrov A, Dubikovsky V, et al. Water-cooled bimorph correctors[C]//Proc SPIE 6018, 2006:300-304.

Fabrication and characterization of rectangular water cooling piezoelectric deformable mirror

YAO Qi, LUO Fan, YU Licheng, MA Jianqiang*

(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to solve the problem of laser beam distortion, a rectangular water cooling piezoelectric deformable mirror driven by an edge is proposed. The finite element model is established to simulate the correction performance and thermal performance of the deformable mirror. The simulation results show that the cooling effect is remarkable when the temperature of the deformable mirror drops to 45 °C under the cooling condition of the laser irradiation with the power of 10 kW. A prototype of a 60-unit 20 mm×4 mm deformable mirror is successfully prepared in the experiment, and an adaptive optical test system based on Shack-Hartman sensor is built, the typical actuator influence function, correction performance and frequency response characteristics of the deformable mirror are characterized. The experimental results show that the typical actuator deformations are about 1.0–1.5 μm under 100 V, and can reconstruct the surface shape of low-order sine function accurately, and the first-order natural frequency is about 650 Hz. The rectangular water cooling piezoelectric deformable mirror has a certain ability to correct, and has a certain application prospect in the field of low cost strip laser correction.

Key words: adaptive optics; water cooling; piezoelectric deformable mirror; strip laser

(责任编辑 史小丽)