

# 20 单元双压电片变形镜的性能测试与闭环校正实验研究\*

宁 禹<sup>1,2)†</sup> 余 浩<sup>1,2)</sup> 周 虹<sup>1,3)</sup> 饶长辉<sup>1)</sup> 姜文汉<sup>1)</sup>

1) 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

2) 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

3) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2008 年 9 月 24 日收到, 2008 年 11 月 13 日收到修改稿)

测试了 20 单元双压电片变形镜的影响函数、变形量-电压特性曲线、面形热稳定性和频率响应特性, 并搭建基于 20 单元双压电片变形镜和  $13 \times 13$  阵列哈特曼传感器的自适应光学系统, 测试了该变形镜对自身初始面形和静态像差板的闭环校正效果. 实验结果表明, 各分立电极变形量对加载电压的平均灵敏度为  $0.57 \mu\text{m}/100 \text{ V}$ , 离焦电极的灵敏度为  $1.09 \mu\text{m}/100 \text{ V}$ ; 各电极变形量-电压响应曲线均存在迟滞现象, 滞后量在最大变形量的 10% 以内; 在温度引起的双压电片变形镜面形变化中离焦项贡献最大, 其变化对温度也最为敏感, 在  $13 \text{ }^\circ\text{C}$  到  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  的测试区间内, 离焦项 P-V 值增大了  $1.37 \mu\text{m}$ , 而像散、彗差和球差项的 P-V 变化均小于  $0.15 \mu\text{m}$ ; 该变形镜对于频率在  $0\text{--}3 \text{ kHz}$  范围内的电压输入信号可以均匀、稳定的响应, 谐振频率在  $4 \text{ kHz}$  左右. 闭环条件下, 双压电片变形镜能够对自身面形和静态像差板进行有效校正. 校正前后焦平面上的远场光斑质量得到显著提高, Strehl Ratio 分别从 0.02 和 0.03 提高到 0.95 和 0.54.

关键词: 自适应光学, 双压电片变形镜, 特性分析, 闭环校正

PACC: 4278C, 7760

## 1. 引 言

一个典型的自适应光学(adaptive optics, AO)系统通常由波前传感器、波前校正器、波前控制器三部分构成, 波前传感器测量出波前误差, 波前控制器通过控制波前校正器产生所需的校正量, 从而使校正后的光束波前接近理想的平面或球面. 波前校正器是自适应光学系统的核心器件, 其性能指标优劣决定了整个系统的实用性大小.

目前, 国内的自适应光学系统中大多采用中科院光电所自主研发的连续表面分立压电变形镜完成波前像差的校正功能, 该变形镜具有波前拟合误差小、光能利用率高、空间分辨率高、能保持相位连续和易于抛光镀膜等优点<sup>[1, 2]</sup>. 但基于现有构造工艺, 连续表面分立变形镜的构造周期较长、工序较为复杂, 导致其成本较高. 此外, 受限于结构和驱动方式,

分立压电变形镜电极之间的间距一般在  $8 \text{ mm}$  左右, 也就是说为了保证一定的空间校正能力分立压电变形镜的镜面尺寸往往较大, 使得整个自适应光学系统体积也难以缩小. 因此, 高成本和难以小型化是目前阻碍自适应光学系统拓展应用领域的两个主要原因. 在优化现有变形镜构造方法的同时, 寻找结构更加简单、成本更加低廉、校正能力符合要求的新型变形镜是解决上述问题的有效途径.

双压电片变形镜(Bimorph DM)是波前校正器的一种, 其概念是 Adelman 于 1977 年提出的<sup>[3]</sup>. 1989 年 Abbas 等首次采用 Bimorph DM 校正激光器中热透镜效应引起的畸变<sup>[4]</sup>. 经过 20 多年的发展, 伴随着构造材料的丰富和构造工艺的成熟, 国际上 Bimorph DM 已从最初的概念型器件演化为实用的波前校正器产品, 并被成功应用于天文、军事和民用领域的多个自适应光学系统中. 动态范围大、激光辐照破坏阈值高、结构相对简单并可直接与曲率传感

\* 国家高技术研究发展计划和国家自然科学基金(批准号: 60438030)资助的课题.

† E-mail: ningyu\_0205@126.com

器配合使用来提高 AO 系统的响应速度是其相对于其他几种变形镜的优势所在<sup>[5]</sup>.

我国的 Bimorph DM 研究起步较晚, 相关报道较少且以影响函数测试优化为主要内容<sup>[6]</sup>. 本文围绕中科院光电所自行研制的 20 单元 Bimorph DM, 对其主要性能指标进行较全面的测试分析, 包括影响函数、变形量-电压特性曲线、面形热稳定性和频率响应特性. 并搭建基于 20 单元 Bimorph DM 和哈特曼传感器的闭环自适应光学系统, 考察了该 DM 对静态像差的空间校正能力.

## 2. 20 单元 Bimorph DM 简介

20 单元 Bimorph DM (图 1(a)) 由三层材料构成,

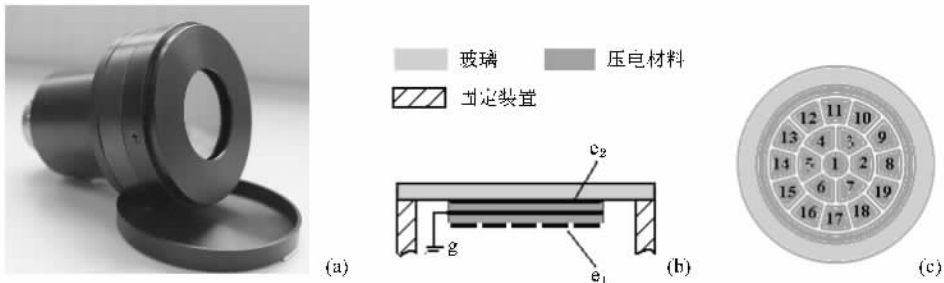


图 1 (a) 封装 20 单元 Bimorph DM 实物图 (b) 层结构 (c) 电极排布示意图

## 3. 20 单元 Bimorph DM 主要性能测试结果

变形镜的特性是由材料和结构共同决定的, 了解变形镜的各项性能指标是利用其进行闭环像差校正的前提和基础, 也是器件进一步优化改进的主要依据. 本文实验测定了 20 单元 Bimorph DM 的影响函数、变形量-电压响应曲线、面形热稳定性和频率响应几项主要特性参数.

### 3.1. 影响函数

变形镜的影响函数是指各驱动电极加载一定电

包括一层上表面抛光镀膜作为反射面的玻璃基底和两层材料、尺寸完全相同的压电薄片, 每层压电薄片的上下表面都镀有金属电极层(图 1(b)). 图中浅色代表被动层(一般由玻璃或硅材料构成), 深色代表压电层(由具有压电性质的材料构成),  $g$  代表公共地电极,  $e_1, e_2$  代表控制电极层位置. 控制层  $e_1$  上分布着 19 个分立电极, 控制层  $e_2$  上为一整片离焦电极(标记为 No.20). 理想情况下 Bimorph DM 初始面形平整, 当在薄片两侧加载电压后, 由于横向逆压电效应压电层沿横向发生伸展而被动层保持不变, 横向尺寸的变化差异导致整个黏结层结构产生弯曲变形. 也就是说, Bimorph DM 主要是依靠相邻黏接层之间横向变形量的差异完成形变的.

压时产生的镜面面形. 影响函数与变形镜的驱动方式、构成材料的力学性质、驱动器的形状、布局和器件的装夹方式等密切相关, 它是影响变形镜变形的各个因素的综合反映. 本文采用 Veeco 干涉仪 (WYKO-RTI4100, 测试精度为  $\pm \lambda/20$ ,  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ) 测量了 400 V 电压下, 镜面 30 mm 口径内 20 单元 Bimorph DM 各电极影响函数. 测试结果表明各环上电极的影响函数具有较好的旋转对称性, 位置具有代表性的 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、8<sup>#</sup> 和 20<sup>#</sup> 电极影响函数及相应 P-V 值如图 2 所示. 经计算, 各分立电极变形量对加载电压的平均灵敏度为  $0.57 \mu\text{m}/100 \text{V}$ , 离焦电极的灵敏度为  $1.09 \mu\text{m}/100 \text{V}$ .

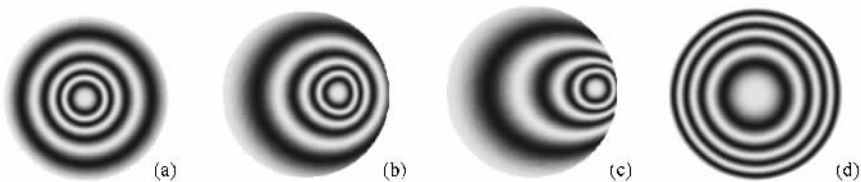


图 2 30 mm 口径内 400 V 电压下 Bimorph DM 各典型电极变形量干涉仪测量结果 (a) No.1, P-V =  $2.28 \mu\text{m}$  (b) No.2, P-V =  $2.40 \mu\text{m}$ ; (c) No.8, P-V =  $2.16 \mu\text{m}$  (d) No.20, P-V =  $4.36 \mu\text{m}$

### 3.2. 变形量-电压响应曲线

当对变形镜任一电极施加正负循环电压时,其变形量-电压特性曲线应为一个封闭曲线。图3记录了30 mm口径内Bimorph DM典型电极1#、2#、8#中心位置变形量 $W$ 随电压 $V$ 的变化关系,电压变化顺序在图中由箭头序号标出。

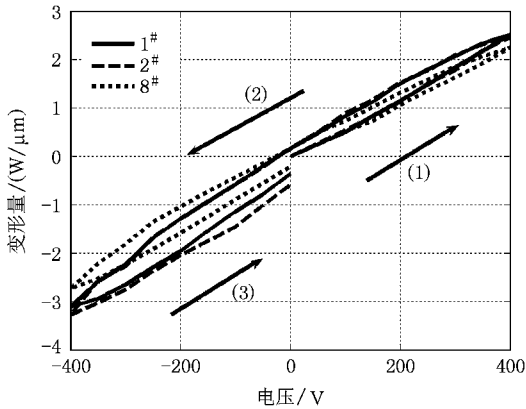


图3 1#、2#和8#电极变形量-电压响应特性曲线

分析图3,可得出以下两点结论:

1) Bimorph DM表面的变形量-电压特性曲线近似成环形,它反映了叠加结构的整体变形具有一定非线性,这种非线性是由变形镜的材料特性和结构造成的,而变形量-电压线性关系只是一定条件下对实际情况的假设。

2) 加载电压与变形量之间并不是一一对应关系,电压一定时,表面变形量的具体数值还与器件前一刻的状态有关,这一特性将给准确控制Bimorph DM面形带来困难。

为了对上述测量结果加以定量描述,设图3环形曲线上对应同一电压的两点值为 $W_{up}$ 和 $W_{down}$ ,不难看出在 $V=0$ 处(去除初始测量点) $W_{up}$ 和 $W_{down}$ 差值最大,在 $\pm 400$  V处变形量达到了极值 $W_{max}$ 和 $W_{min}$ 。定义变形滞后量为 $\eta$ ,

$$\eta = ((W_{up}(0) - W_{down}(0)) / (W_{max} - W_{min})) \times 100\%$$

经计算 $\eta_1 = 9.4\%$ ,  $\eta_2 = 13.1\%$ ,  $\eta_8 = 7.54\%$ ,各滞后量的平均 $\bar{\eta} = 10\%$ ,也就是说Bimorph DM各电极的滞后量均在最大变形量的10%以内。

### 3.3. 面形热稳定性

面形热稳定性是Bimorph DM的另一项性能指标,所谓热稳定性,是指反射镜表面面形随环境温度

的变化特性。由于玻璃和压电材料的热膨胀系数很难严格相等,那么当环境温度发生变化时,整个Bimorph DM层叠结构将产生热致弯曲变形。

实验采用哈特曼传感器测量了13℃、16℃、20℃和25℃四个温度点上Bimorph DM面形随温度的变化情况,为了使测量结果更加清晰,将温度引起的面形变化量进行Zernike分解,并将主要几项的P-V改变量列于图4中,该变形镜更加详细的热稳定性测试结果请参考文献[7]。从图4可知,在温度引起的面形变化中离焦项贡献最大,其变化对温度也最为敏感,在13℃到25℃的测试区间内,离焦项P-V值增大了1.37 μm,而像散、彗差和球差项的P-V变化均小于0.15 μm。这主要源于实验Bimorph DM的结构和装夹方式呈中心轴对称分布,当温度变化时,各层材料热膨胀系数不同引起的径向应力差导致整个面形发生弯曲。

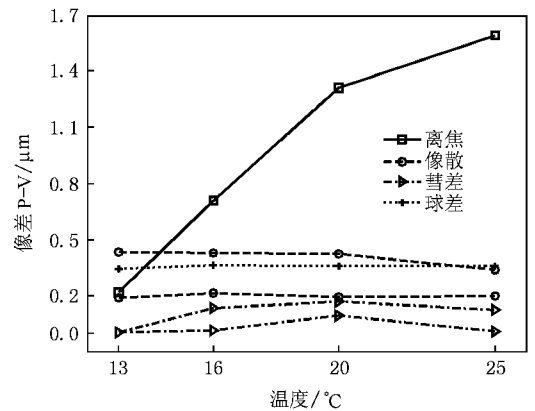


图4 四个测试温度点,Bimorph DM面形变化量中所含离焦、像散、彗差和球差项的P-V值

### 3.4. 频率响应特性

频率响应特性,是指器件的输出增益随输入信号频率的变化而提升或衰减和相位滞后随输入信号频率而改变的现象。论文采用TD1250频响分析仪和四象限探测器测量了Bimorph DM器件对于一定频率范围内正弦输入电压信号的幅值和相位响应特性。

实验选取1#电极为研究对象,输入信号频率范围为0—7 kHz(为减小对器件的损害,没有加大测试范围),测得频率响应特性曲线见图5。可以看出,Bimorph DM对0—3 kHz频率区间信号的振幅和相位响应基本平稳,谐振频率在4 kHz左右。

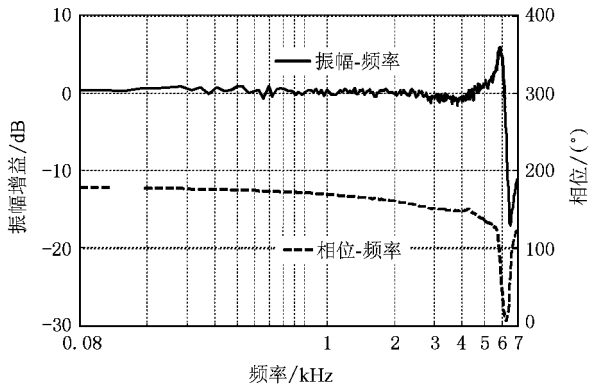


图 5 20 单元 Bimorph DM 1# 电极频率响应特性曲线测量结果

#### 4. 基于 20 单元 Bimorph DM 和 $13 \times 13$ 阵列哈特曼传感器的 AO 系统

在测试了 20 单元 Bimorph DM 主要特性参数基础上,搭建基于该变形镜和  $13 \times 13$  阵列哈特曼传感器的闭环实验系统,采用基于直接斜率法的修正控制算法进行控制,目的是检验 Bimorph DM 在闭环工作条件下对电压的连续响应能力,考察其对像差的空间校正能力。

闭环实验系统包括以哈特曼传感器为探测器的近场光路部分、CCD 相机为探测器的远场光路部分和以工业计算机为主体的驱动控制系统,系统结构见图 6。哈特曼传感器 1 内部发出的准平行光束穿过分束镜 2、像差板 3,垂直入射至 Bimorph DM 4 表面(此部分光用黑色箭头标出),反射光再次经过像差板 3 并被分束镜 2 分为两束,一束返回哈特曼传感器,另一束经长焦平行光管聚焦,经衰减片后由 CCD 相机接收(此部分光用灰色箭头标出)。

实验中首先将变形镜和哈特曼对立放置,通过哈特曼自带的粗对准、精对准和测量环节中的细微调节,调整变形镜的俯仰、左右转动,使反射光与出射光严格同轴。然后将分束镜放在哈特曼出口处,调整镜面角度,使 Bimorph DM 反射回来的光有一部分被分束镜到聚焦透镜中,通过实时图像采集,保证 CCD 靶面位于聚焦透镜的焦平面附近,且焦斑大致位于靶面中心。最后在 Bimorph DM 前插入平面反射镜,在远场 CCD 光斑接近该系统理想艾里斑的同时对哈特曼传感器进行标定,这样保证了近场、远场测量条件的一致性。

调整好光路后移除平面反射镜,测量单位加载电压下各电极的响应面形对应的哈特曼各子孔径内

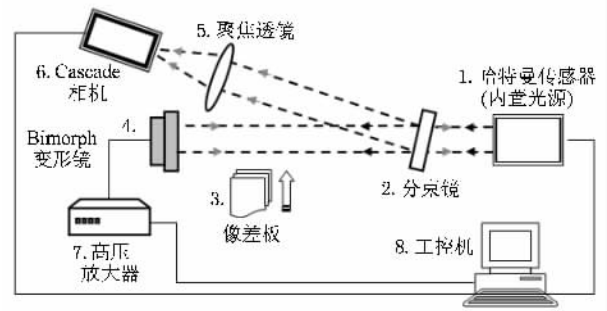


图 6 闭环实验系统结构示意图 1. 哈特曼传感器( $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$ , 采样频率 25 帧/秒, 探测精度  $0.1\lambda$ ) 2. 分束镜 3. 像差板; 4. 20 单元 Bimorph DM 5. 聚焦透镜( $f = 1.12 \text{ m}$ ) 6. Cascade 相机( $635 \times 492$  像素, 像素边长  $7.4 \mu\text{m}$ , 14 位分辨率) 7. 高压放大器(80 倍) 8. 工控机(内置 ADLINK PCI-6216V D/A 卡, OK-M10A 图像采集卡及相应闭环控制程序)

光斑偏移数据,即电压-斜率响应矩阵。然后重新导入哈特曼平面镜标定数据,插入像差板,由哈特曼测量波前畸变并保存数据,同时采集远场 CCD 图像。打开高压放大器,由 Bimorph DM 实施闭环校正,当校正状态达到稳定后,同样如上述步骤采集数据。为避免变形镜由于加压过高受到损坏,程序中限定分立电极加载电压的绝对值不超过 320 V,离焦电极不超过 250 V,远小于器件测试时单电极加载的测试电压。每更换一次像差板,都使变形镜在静态条件下停留足够时间,以消除上一次加电的残留影响。

#### 5. 静态像差闭环校正实验结果及仿真结果

经过上述步骤,实验中分别测试了 Bimorph DM 在闭环条件下对自身面形和静态像差板的波前校正效果(图 7)。每组结果包括以下四部分内容:1) 开环和闭环状态下哈特曼传感器测量得到的单程波前相位数据(第一列);2) 根据上述波前相位数据进行傅里叶变换,得到相应远场光斑分布(第二列);3) CCD 相机实际测得的远场光斑(第三列);4) 根据文献[8]有限元模型计算的影响函数拟合实验中哈特曼探测到的开环波前畸变,得出拟合残余波面及相应远场(第三行)。各波前的 P-V, RMS 和 Strehl Ratio (SR) 列于相应结果下方。

从闭环实验结果可得出以下结论:

1) 哈特曼传感器和 CCD 相机反映出的波前畸变信息具有很好的一致性,这说明了实验结果真实可信。仿真计算得到残余波前的各项性能指标与实

测结果差别较小,进一步验证了文献 [8] 中建立的有限元模型是较准确的,这为实际器件设计和优化提供了理论保障。

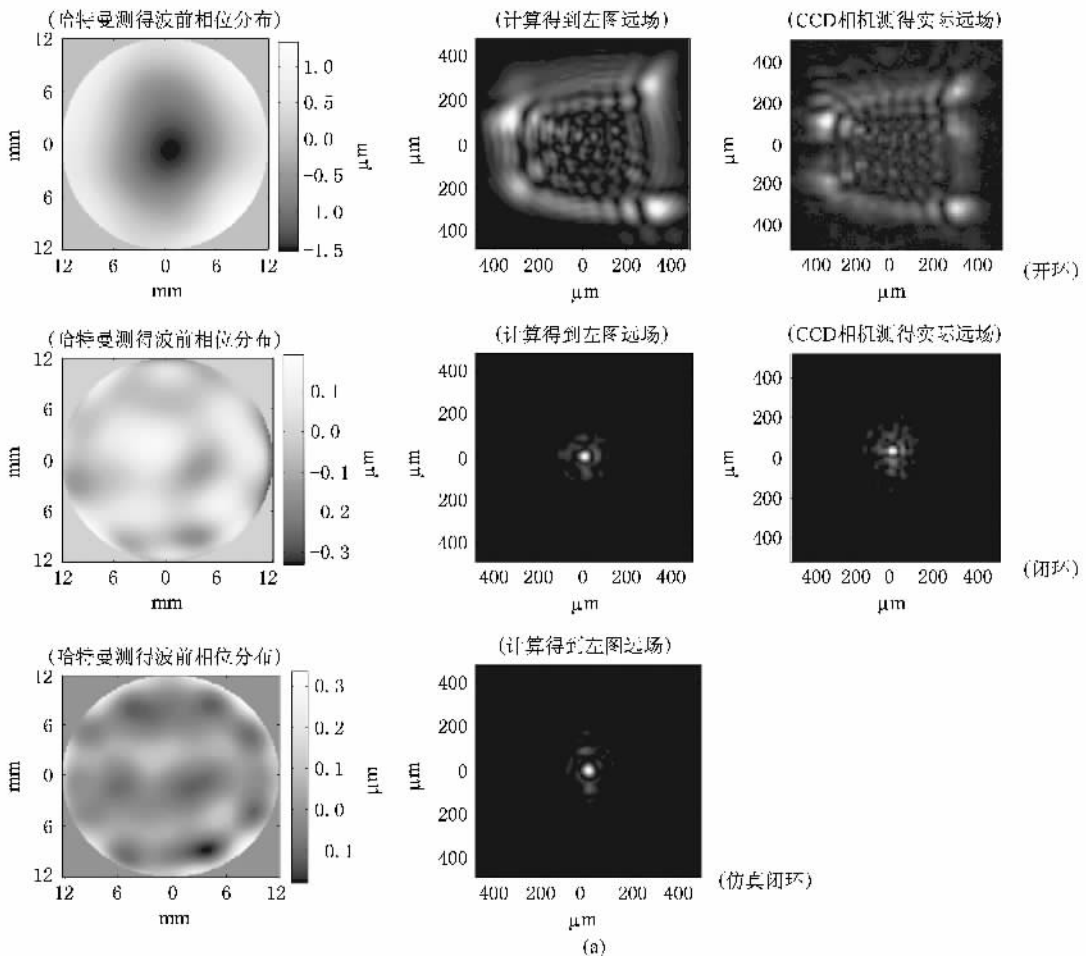
2)对于自身初始面形校正残差的 SR 达到 0.9 以上,证明 Bimorph DM 对自身面形具有一定的“修复”能力,目前由于工艺条件和材料的限制初始面形的畸变是不可避免的,因此对自身面形的良好补偿可以适当降低器件构造过程中的压力.对静态像差板进行校正后畸变波前的远场光斑质量得到了很大改善,SR 从 0.03 提高到 0.54.从上图可以看出,两组待校正像差的幅值均在变形镜的校正范围之内,但像差板在光路中引入像差的空间分布频率比初始面形高.由于变形镜的驱动单元数量有限,其波前校正能力必然随着像差空间频率的增高而有所降低。

3)整个闭环实验时间跨度较长、反复次数很多,经初步测试 20 单元 Bimorph DM 各电极对电压的响应重复性较好,且由压电材料造成的变形量-电压迟

滞响应并没有对静态像差的闭环校正过程产生较大影响。

## 6. 结 论

本文实验测试了 20 单元 Bimorph DM 的各主要特性参数,包括影响函数、变形量-电压特性曲线、面形热稳定性和频率响应特性,并搭建基于 20 单元双压电片变形镜和  $13 \times 13$  阵列哈特曼传感器的自适应光学系统,测试了该变形镜对自身初始面形和静态像差板的闭环校正效果.实验结果表明,20 单元 Bimorph DM 各电极对电压的响应重复性较好,且由压电材料造成的变形量-电压迟滞响应并没有对静态像差的闭环校正过程产生较大影响. Bimorph DM 能够对自身面形和静态像差板进行有效校正,校正前后焦平面上的远场光斑质量得到显著提高,Strehl 比分别从 0.02 和 0.03 提高到 0.95 和 0.54.



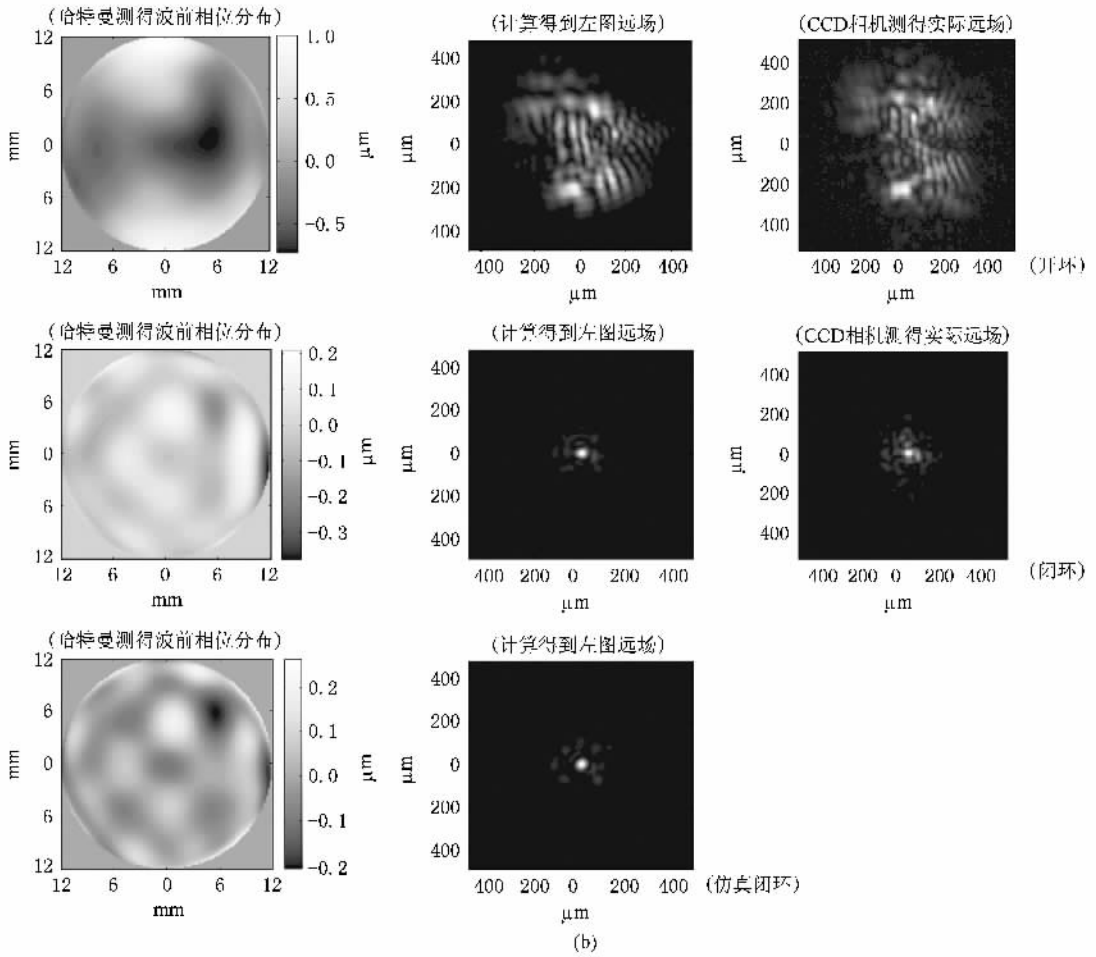


图7 开环和闭环状态下畸变波前近场相位和远场光斑比较。(左)哈特曼测得单程波前相位畸变;(中)由波前相位畸变计算得到的相应远场光斑分布;(右)CCD相机实际测得远场光斑分布。(a)Bimorph DM校正自身面形(开环:P-V = 1.87  $\mu\text{m}$ , RMS = 0.44  $\mu\text{m}$ , SR = 0.02;闭环:P-V = 0.15  $\mu\text{m}$ , RMS = 0.02  $\mu\text{m}$ , SR = 0.95;仿真闭环:P-V = 0.14  $\mu\text{m}$ , RMS = 0.03  $\mu\text{m}$ , SR = 0.96)(b)Bimorph DM校正像差板与自身面形构成的组合像差(开环:P-V = 1.77  $\mu\text{m}$ , RMS = 0.41  $\mu\text{m}$ , SR = 0.03;闭环:P-V = 0.59  $\mu\text{m}$ , RMS = 0.07  $\mu\text{m}$ , SR = 0.54;仿真闭环:P-V = 0.48  $\mu\text{m}$ , RMS = 0.06  $\mu\text{m}$ , SR = 0.57)

- [ 1 ] Zhang Y D , Ling N , Yang Z P et al 2002 *Proc. of SPIE* **4494** 96
- [ 2 ] Rao C H , Jiang W H , Zhang Y D et al 2006 *Chinese Journal of Quantum Electronics* **23** 295 (in Chinese)[ 饶长辉、姜文汉、张雨东等 2006 *量子电子学报* **23** 295 ]
- [ 3 ] Adelman N T 1977 *Appl. Opt.* **16** 3075
- [ 4 ] Abbas A , Kapsov L N , Kudryashov A V , Chistyakov I M 1989 *Sov. J. Quantum Electron* **19** 1338
- [ 5 ] Vdovin G , Loktev M , Simonov A 2005 *Proc. of SPIE* **5894** 1
- [ 6 ] Yang Q , Zhu J P , Cao G R 1999 *Acta Optica Sinica* **19** 1163 (in Chinese)[ 杨强、朱建平、曹根瑞 1999 *光学学报* **19** 1163 ]
- [ 7 ] Ning Y , Zhou H , Yu H , Rao C H , Jiang W H 2008 *Chin. Phys. B* **18** 1089
- [ 8 ] Ning Y , Zhou H , Guan C L , Rao C H , Jiang W H 2008 *Acta Optica Sinica* **28** 1638[ 宁禹、周虹、官春林、饶长辉、姜文汉 2008 *光学学报* **28** 1638 ]

# Performance test and closed-loop correction experiment of a 20-element bimorph deformable mirror<sup>\*</sup>

Ning Yu<sup>1,2,†</sup> Yu Hao<sup>1,2</sup> Zhou Hong<sup>1,3</sup> Rao Chang-Hui<sup>1</sup> Jiang Wen-Han<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*

<sup>2</sup> *College of Photon-electron Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*

<sup>3</sup> *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

( Received 24 September 2008 ; revised manuscript received 13 November 2008 )

## Abstract

Performances of a 20-element bimorph deformable mirror are measured and a closed-loop adaptive optics system, which consists of the bimorph mirror and a Shack-Hartmann wave-front sensor with  $13 \times 13$  sub-aperture array, is established to test the mirror's capability of correcting static aberrations. Experimental results show that, the mean displacement response to voltage of discrete actuators is  $0.57 \mu\text{m}/100 \text{ V}$  and that of defocus electrode is  $1.09 \mu\text{m}/100 \text{ V}$ . The hysteresis of actuator is limited to ten percents of the maximal displacement. With the ambient temperature increasing from  $13 \text{ }^\circ\text{C}$  to  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , the P-V of defocus of the mirror surface is enlarged by  $1.37 \mu\text{m}$  and the P-V of other distortions, such as astigmatism, coma and spherical aberration, is enlarged by  $0.15 \mu\text{m}$ . The frequency response of the bimorph mirror is about 4 kHz. When the closed-loop control is on, intensity distributions at the image plane of distorted wave-fronts are effectively improved. The Strehl ratios increase from 0.02 to 0.95, and 0.03 to 0.54, respectively.

**Keywords** : adaptive optics, bimorph deformable mirror, performance analysis, closed-loop correction

**PACC** : 4278C, 7760

<sup>\*</sup> Project supported by the National Hi-tech Project and National Natural Scientific Foundation of China ( Grant No. 60438030 ).

<sup>†</sup> E-mail : ningyu\_0205@126.com