

## 自适应光学波前校正器技术发展现状

林旭东<sup>1\*</sup>, 薛 陈<sup>2</sup>, 刘欣悦<sup>1</sup>, 王建立<sup>1</sup>, 卫沛锋<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国西南电子设备研究所, 四川 成都 610036)

**摘要:**波前校正器是自适应光学系统中的关键部件,相关技术已得到了多年的积累与发展。本文介绍了多种目前常用的波前校正器件,包括分离促动器连续表面变形镜、拼接子镜变形镜、薄膜变形镜、双压电片变形镜、微电子机械系统变形镜以及基于液晶技术的空间光调制器和自适应次镜等,给出了它们的实现方式及其基本工作原理,并从空间校正频率和校正速度等方面对各校正器的性能进行了比较。最后,总结了在新应用的需求下,波前校正器的技术创新及发展趋势。

**关键词:**自适应光学;波前校正器;变形镜;工作原理;现状

中图分类号:O439 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20120504.0337

## Current status and research development of wavefront correctors for adaptive optics

LIN Xu-dong<sup>1\*</sup>, XUE Chen<sup>2</sup>, LIU Xin-yue<sup>1</sup>, WANG Jian-li<sup>1</sup>, WEI Pei-feng<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: linxudong\_82@126.com*

**Abstract:** Wavefront correctors are the key components of the adaptive optical systems and the techniques to fabricate wavefront correctors have been developed for many years. This paper introduces several kinds of wavefront correctors that are commonly used in adaptive optical systems, such as the deformable mirror with discrete actuators and continuous faceplate, segmented deformable mirror, membrane deformable mirror, bimorph deformable mirror, MEMS deformable mirror, liquid crystal corrector and the adaptive secondary mirror. The realization methods of the wavefront correctors and their working principles are presented in detail, and the performance, the number of degrees of freedom and the speed of response are compared. Finally, it summarizes the technology innovations and development trends of the wavefront correctors in the new applications.

**Key words:** adaptive optics; wavefront corrector; deformable mirror; working principle; current status

## 1 引言

1953年,美国天文学家 Babcock 发表论文<sup>[1]</sup>首次提出用闭环校正波前误差的方法来补偿天文视宁度,此方法成为了自适应光学的创始设想。自适应光学技术是以光学波前为控制对象的自动控制系统,利用对光学波前的实时测量校正,使光学系统具有自动适应外界条件变化,始终保持良好工作状态的能力。

自适应光学系统包含3个主要组成部分:波前传感器、计算控制处理器和波前校正器。波前传感器用于测量光瞳面位置的光学像差,有 Shack-Hartmann 传感器<sup>[2]</sup>、Pyramid 传感器<sup>[3]</sup>、曲率传感技术<sup>[4]</sup>和剪切干涉技术<sup>[5]</sup>等多种实现形式。计算控制处理器把波前传感器的输出实时转化为波前校正器的输入。根据波前处理实时性的要求,计算控制单元有不同的构建模式<sup>[6-9]</sup>。波前校正器在光路中一般与波前传感器成共轭位置关系,它能够主动产生一个面形以补偿所测得的波前误差。目前,市场上已经能够买到一些波前校正器,但是,由于其在自适应光学系统中的重要性,针对不同应用需求的新型波前校正器仍然是当前的研究热点,也是本文的关注点。

波前校正器通过改变光波前传输的光程或改变传输媒介的折射率来改变入射光波前的相位结构,从而达到对波面相位进行校正的目的。大多数波前校正器是通过改变自身镜面的面形(即改变光程差)实现对波面相位的校正,而其它如基于液晶技术的器件是通过改变折射率的方法对波面相位进行校正的<sup>[10]</sup>。一般要求波前校正器有足够多的空间自由度,能够很好地拟合所要校正的波像差,而且响应速度应远超过扰动波前的时间改变频率<sup>[11]</sup>。当然,波前校正器的线性度、校正量、实现的难易程度、成本等因素也是考虑的要

点。目前,波前校正器主要有分离促动器连续表面变形镜、拼接子镜变形镜、薄膜变形镜、双压电片变形镜、微电子机械系统(MEMS)变形镜、基于液晶技术的空间光调制器及自适应次镜。20世纪90年代之前,波前校正器(主要是变形镜)的

研究进展已在文献[12]中详细介绍。本文主要综述了各波前校正器的最新进展,介绍了各校正器的基本原理,分析了研制技术难点和现状,以及应用发展趋势。

## 2 各波前校正器基本原理及技术现状

### 2.1 分离促动器连续镜面变形镜

这种变形镜的基本结构如图1所示,它主要由3个部件组成:基底、促动器和连续镜面薄片。薄片面形由促动器的推拉改变。要求基底的刚度远大于薄镜片的刚度,这样,促动器的推拉运动效果就会大部分地在薄镜片上面反应出来,文献[13]中详细介绍了这种变形镜的设计要点。

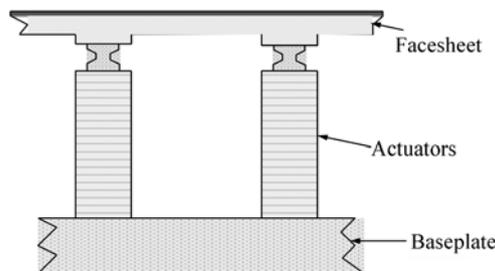


图1 分离促动器连续表面变形镜的基本构成

Fig.1 Main construction of deformable mirror with discrete actuators and continuous faceplate

#### 2.1.1 分离促动器连续镜面变形镜的基本原理

这种变形镜采用的促动器一般由压电或电致伸缩材料制成,由铅钛酸铅材料  $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$  制成的压电促动器称为 PZT,由铌镁酸铅材料  $\text{Pb}(\text{Mg}, \text{Nb})\text{O}_3$  制成的电致伸缩促动器称为 PMN。当给促动器施加电压时,促动器的长度会发生改变,从而引起镜面的局部面形发生类似高斯函数的形变<sup>[14]</sup>,整体镜面的面形可以简化表示为:

$$r(x, y) = \sum_i V_i r_i(x, y), \quad (1)$$

式中:  $V_i$  表示给第  $i$  个促动器施加的电压,  $r_i(x, y)$  为第  $i$  个促动器处镜面的响应函数。一个促动器作用时,其相邻促动器位置的镜面面形也会发生变形,其变形量一般为最大变形量的 10% ~ 30%,称作耦合系数。响应函数及耦合系数决定了变形镜对像差的校正能力,而它们又由设计时

的诸多参数确定,如薄镜片的材料与厚度、促动器的材料特性、促动器排列间距等<sup>[15]</sup>。

### 2.1.2 分离促动器连续镜面变形镜的技术现状及发展

中科院光电技术研究所已研制成多套自适应光学系统<sup>[16]</sup>。较早的37单元自适应光学系统<sup>[17]</sup>中,变形镜采用的就是分离促动器连续镜面的形式,变形镜共有55个促动器,内3圈有37个主促动器,外圈是18个辅助促动器,辅助促动器用于改善镜面外围主促动器的响应函数,其上所加电压是相邻两个主促动器电压的平均值。该变形镜的通光口径为100 mm,变形量为 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ ,非线性滞后 $< \pm 4\%$ ,谐振频率 $> 2 \text{ kHz}$ 。之后研制的61单元变形镜<sup>[18-19]</sup>有61个促动器,镜面通光口径为120 mm,最大变形量为 $\pm 3 \mu\text{m}$ ,非线性滞后 $< 5\%$ ,谐振频率 $> 2 \text{ kHz}$ ,耦合系数为 $8\% \sim 12\%$ ,图2为61单元变形镜的促动器与波前传感器的子孔径排列对准关系图。近两年,他们又研制了127单元变形镜,并在望远镜上取得了观测效果<sup>[20]</sup>。

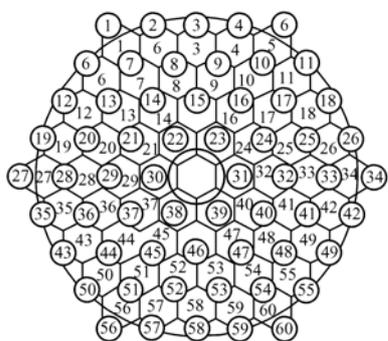


图2 61单元变形镜的促动器布局 and 传感器子孔径的对应关系

Fig.2 Relative positions of DM actuators with 61 elements and subapertures of Hartmann sensor

中科院长春光机所自适应光学技术研究小组成功研制了21,97和137单元分离促动器连续镜面变形镜<sup>[21-23]</sup>,图3为137单元变形镜的促动器排列示意图和变形镜实物图,促动器采用低压PZT压电陶瓷材料。137单元变形镜通光口径为90 mm,促动器采用 $13 \times 13$ 的正方形排列方式,促动器间距为7 mm,最大变形量为 $\pm 2.5 \mu\text{m}$ ,相邻促动器位置变形量为 $3 \mu\text{m}$ ,非线性迟滞 $< 5\%$ ,整

体谐振频率 $> 12 \text{ kHz}$ ,耦合系数为 $22\% \sim 26\%$ ,经过主动展平之后全口径面形优于 $\lambda/50$ ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )RMS。

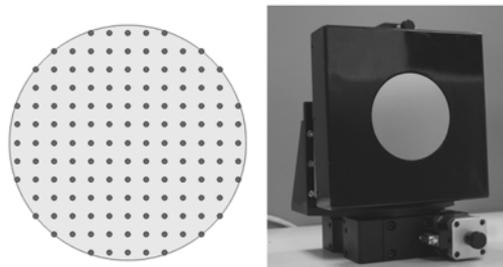


图3 137单元变形镜及其促动器排列示意图

Fig.3 137-element DM and its actuator arrangement

20世纪90年代后,国外1000单元以下量级、促动器间距在 $4 \sim 8 \text{ mm}$ 之间的分离促动器连续镜面变形镜的技术已比较成熟,并在大望远镜上得到了应用<sup>[24-27]</sup>,而且有了标准的产品对外出售。法国CILAS公司的变形镜大部分采用PZT压电陶瓷材料,图4是其52单元带制冷(用于激光束校正)的变形镜<sup>[28]</sup>,该变形镜通光口径为50 mm,促动器间距为8 mm,以方形 $8 \times 8$ 阵列编排,单促动器最大变形量为 $\pm 2.5 \mu\text{m}$ ,非线性迟滞 $< 5\%$ ,谐振频率 $> 14 \text{ kHz}$ ,主动展平后面形优于 $10 \text{ nm RMS}$ 。

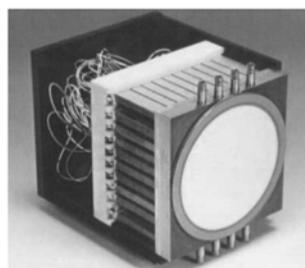


图4 CILAS公司的52单元变形镜

Fig.4 52-element deformable mirror of CILAS Company

美国Xinetics公司的变形镜研发能力也很强,目前已经形成促动器间距分别为5和7 mm的两个变形镜产品系列,促动器单元数从几十单元到接近1000单元。该公司变形镜的促动器大多采用PMN材料,PMN型促动器相对于PZT促动器的优势在于非线性迟滞更小、工作寿命更长,

且 PMN 型促动器所要求的控制电压也较小。但是,PMN 型促动器的响应受温度影响较大,需特殊考虑<sup>[29]</sup>。文献[30]介绍了目前使用的 3 个单元数较多(349、577 和 941)的变形镜的性能测试情况,这 3 个变形镜都是采用分离促动器连续镜面的形式,促动器间距为 7 mm,都是 PMN 促动器。展平后,577 单元变形镜面形优于 17 nm RMS,349 和 941 单元变形镜的面形优于 20 nm RMS。349 单元变形镜应用于 Keck 望远镜的自适应光学系统中,图 5 是 349 单元变形镜的前后视图。941 单元变形镜正用于 SOR3.5 望远镜的自适应光学系统中<sup>[31]</sup>。

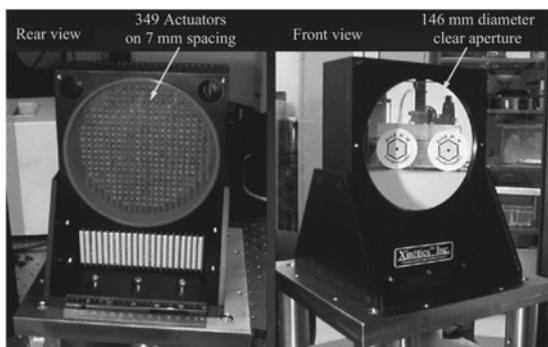


图 5 Keck 望远镜的 349 单元变形镜

Fig. 5 349-element deformable mirror used in Keck telescope

近年来,随着甚大型望远镜的研制和更高分辨率、更高对比度成像要求的提出,变形镜的单元数和面形精度需向更高量级发展。由于薄镜面加工能力的限制,1 000 单元以上量级的变形镜促动

器之间的间距不可能再像之前那么大,否则会造成薄镜面直径过大,难以加工,需要采用高密促动器的加工和制作技术及镜面粘接、加工技术。CILAS 在欧洲南方天文台的支持下开展了高密度变形镜的研制<sup>[32]</sup>,图 6 为其研制的 MiniDM 原型,促动器为 50 × 50 的压电陶瓷阵列形式(图 6 左图所示),间距为 1 mm,采用 PZT 横向压电效应,促动器最大变形量为 3 μm。

为了满足空间日冕观测望远镜<sup>[33]</sup>和行星高分辨率成像望远镜的需要<sup>[34]</sup>,Xinetics 公司进行了 1 000 单元以上量级变形镜及控制系统的研制。这种单元量级的变形镜使用高密度的陶瓷阵列和 3D 陶瓷加工技术。图 7 为高密度陶瓷促动器阵列模块,单元数为 32 × 32,间距为 1 mm。图 8 为经过抛光和镀膜之后的高密度变形镜,促动器阵列为 42 × 42,间距为 1 mm<sup>[35]</sup>。另外,通过多块的高密度陶瓷促动器阵列模块的拼接还可实现更多单元数的变形镜,如 Xinetics 给帕洛马山 5.1 m 望远镜研制的 4 356 单元变形镜采用的就是这种形式,图 9 左侧为促动器模块拼接图片,

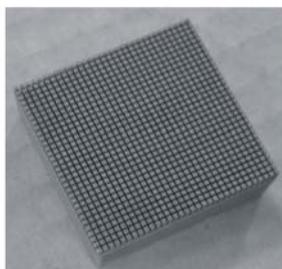
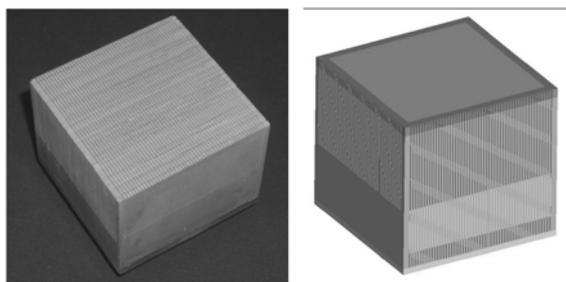


图 7 促动器阵列模块

Fig. 7 Actuator array module



(a) 压电陶瓷促动器阵列  
(a) PZT actuator array

(b) 设计概图  
(b) Design overview

图 6 CILAS 公司的 MiniDM 原型

Fig. 6 MiniDM prototype of CILAS company

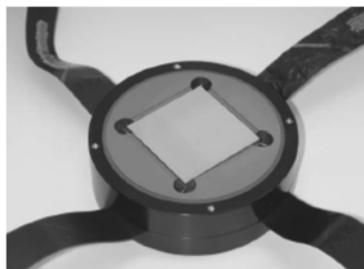


图 8 42 mm × 42mm 变形镜

Fig. 8 42 mm × 42 mm deformable mirror

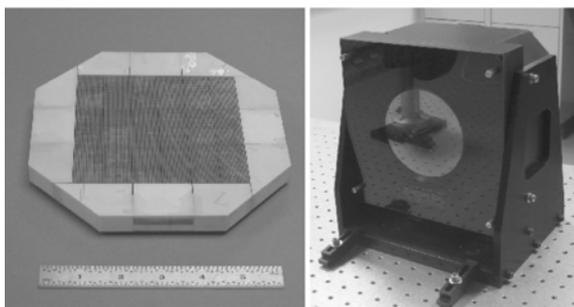


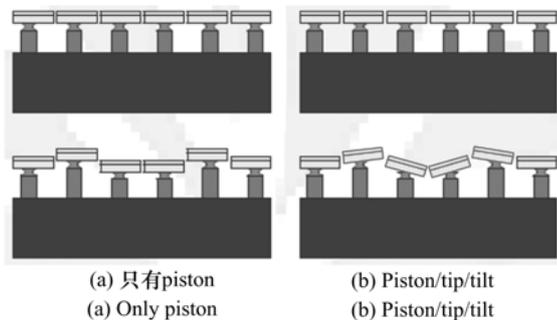
图9 66 × 66 促动器阵列及 4356 单元变形镜

Fig.9 66 × 66 actuator array and 4356-element deformable mirror

右侧为实际的 4 356 单元变形镜<sup>[36]</sup>。

### 2.2 拼接子镜变形镜

拼接子镜变形镜的基本结构如图 10 所示,它的镜面由多个小的子镜拼接而成,每个子镜下面由 1 个(做沿光束传播方向的 piston 运动)或 3 个促动器(包括 piston 和 2D 的倾斜调整 tip/tilt)进行面形调整。显而易见,在对波前校正能力方面每个子镜有 3 个促动器的校正器好于只有 1 个促动器的情况。



(a) 只有piston (a) Only piston (b) Piston/tip/tilt (b) Piston/tip/tilt

图 10 拼接子镜变形镜

Fig. 10 Fundamental structures of segmented deformable mirror

与连续镜面变形镜不同,拼接子镜变形镜每个子镜之间有缝隙,缝隙一方面使光能的利用率降低,另一方面又加大了调整难度,因为每两个相邻子镜的边缘共相位才能保证有连续的波前结构<sup>[37]</sup>,所以在自适应光学系统中的实际应用很少。比较典型的拼接子镜变形镜是 20 世纪 90 年代初 Thermotrex 给美国军方研制的 512 拼接单元变形镜<sup>[38]</sup>,如图 11 所示。其中,每个拼接子镜有

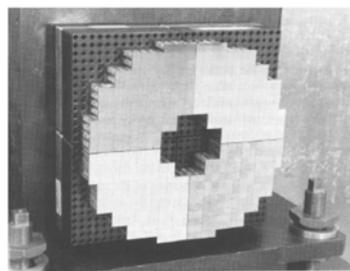


图 11 512 子镜拼接变形镜

Fig. 11 512-segment deformable mirror

3 个压电陶瓷促动器,整个变形镜的通光口径为 22 cm。

针对甚大型望远镜的特点,主镜采用拼接形式,口径为 30 ~ 100 m,文献[39]设计了一套既能校正拼接子镜之间共相位误差(低时间频率),又能校正高时空频率波前像差的自适应拼接 3 镜(为整个望远镜光路系统中的第 3 块镜子)。它利用了前文提到的陶瓷阵列模块技术,如图 12 所示。该自适应拼接 3 镜的每个拼接子镜既可以做 piston 和 tip/tilt 倾斜调整,用于相邻子镜之间的共相位调整,又能校正高频的波前误差。

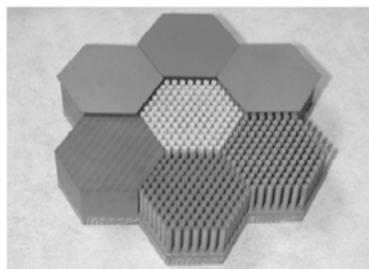


图 12 含有倾斜调整的拼接自适应 3 镜

Fig. 12 Segmented adaptive tertiary mirror with tilt control

### 2.3 薄膜变形镜

#### 2.3.1 薄膜变形镜的基本原理

文献[40]第一次提出了利用薄膜的电致形变效应来制作变形镜的概念。薄膜镜的形变原理如图 13 所示,薄膜自身刚度很小,所以只需很小的力就能使其面形发生改变,一般用图示中的电致伸缩促动器来使薄膜发生形变。薄膜的周围需要固定支撑,并提供张力使薄膜形成平面。文献[41]中给出了薄膜镜的静态形变为:

$$\nabla^2 z = \frac{-p(r)}{T_m}, \quad (2)$$

式中: $p(r)$ 为与控制电压有关的薄膜所受应力(单位是 $\text{Nm}^{-2}$ ), $T_m$ 表示薄膜的线性张力(单位是 $\text{Nm}^{-1}$ )。

由于增加促动器的数量会减小促动器所能产生的变形量,所以薄膜镜一般做成单元数不是很多,这样就有大的校正量适合于校正低阶的波像差。

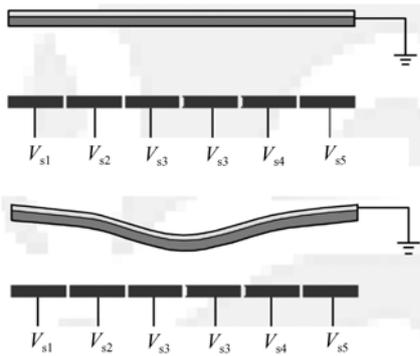


图 13 薄膜镜的变形原理

Fig. 13 Deflection principle of membrane mirror

### 2.3.2 薄膜变形镜的技术发展现状

由于薄膜镜具有整体质量轻、成本低、能够主动校正波像差等优点,满足了空间反射镜超轻、超大口径等的要求,在空间科学领域得到了广泛的应用,文献[42]综述了空间薄膜镜的国内外发展现状。由于薄膜材料较脆、谐振频率较低等因素的影响,薄膜镜在自适应光学技术的应用,特别是在校正高频的大气扰动等方面发展缓慢。但是,由于具有一定的优点,且随着新型材料的出现、新工艺的研究,高促动器单元密度的薄膜变形镜仍然是目前的研究热点<sup>[43]</sup>。1994年,日本SUBARU望远镜的自适应光学系统中设计了一个薄膜变形反射镜<sup>[44]</sup>,图14是其设计图,薄膜材料采用硝化纤维,厚为 $2\ \mu\text{m}$ ,直径为 $50.8\ \text{mm}$ ,有效通光口径为 $25\ \text{mm}$ ,面形为 $0.03\lambda_{\text{rms}}$ ,电极促动器采用 $5\times 5$ 方形排列,间距为 $4\ \text{mm}$ ,控制电压为 $(500\pm 200)\ \text{V}$ ,真空中谐振频率为 $1.6\ \text{kHz}$ 。

荷兰OKO公司目前提供的薄膜镜产品<sup>[45]</sup>有37个 $15\ \text{mm}$ 口径的控制通道、59个 $30\ \text{mm}$ 口径的控制通道、79个 $40/50\ \text{mm}$ 口径的控制通道的薄

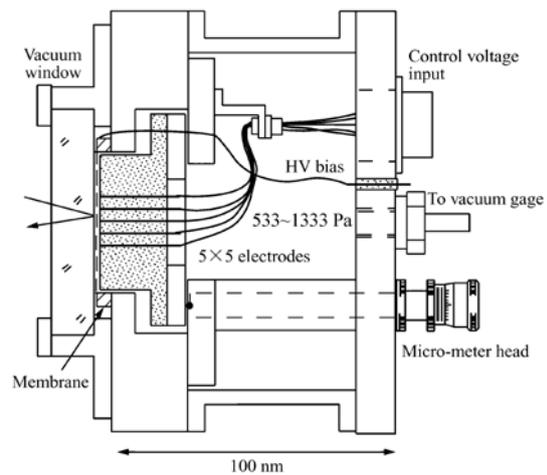


图 14 SUBARU 望远镜薄膜变形镜设计图

Fig. 14 Prototype of membrane deformable mirror of SUBARU telescope

膜镜可选,薄膜材料为氮化硅,厚度为 $500\sim 700\ \text{nm}$ ,单个促动器最大能产生 $1000\ \text{nm}$ 的变形量,电极促动器为 $1.8\ \text{mm}$ <sup>[46]</sup>。图15为其中的37个控制通道 $15\ \text{mm}$ 口径薄膜镜,该变形镜在人眼自适应光学技术中得到了较好的应用<sup>[47-48]</sup>。



图 15 OKO 的 37 单元薄膜变形镜

Fig. 15 37-element membrane deformable mirror produced by OKO

文献[49]报道了高峰值功率激光加工中的激光束整形应用,评估了不同材料制成的薄膜镜的一些不同特性,可以作为薄膜镜设计的参考。

## 2.4 双压电变形镜

### 2.4.1 双压电变形镜的基本原理

双压电片变形镜的基本结构如图16所示,它由2片压电陶瓷片粘接在一起,在2片压电陶瓷片中间排列有控制电极,陶瓷片的上下端面设置

有公共电极,在一面陶瓷面上粘接有一薄光学玻璃片作为反射镜。双压电片变形镜利用的是压电陶瓷的横向压电效应,当给控制电极施加电压时,其中的一片压电陶瓷横向扩张,另一片压电陶瓷横向收缩,整体作用的效果就是使镜面在施加电压的电极位置发生局部弯曲变形<sup>[50]</sup>。镜面的弯曲变形可以表示为:

$$\nabla^4 r(x,y) = -A \nabla^2 V(x,y), \quad (3)$$

式中: $V(x,y)$ 为压电陶瓷片平面上的电极电压分布, $A$ 是一个常量,与压电陶瓷片的材料特性有关。

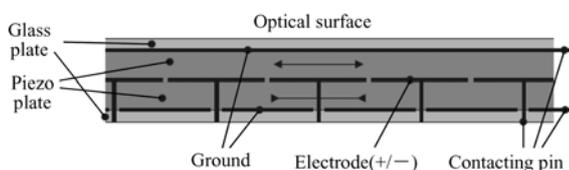


图 16 双压电片变形镜的横截面示意图

Fig. 16 Cross section of bimorph deformable mirror

### 2.4.2 双压电变形镜的技术发展现状

在国内,北京理工大学较早开始进行双压电片变形镜的研究,他们对自制的 13 单元双压电片变形镜的控制电极进行了优化设计<sup>[51]</sup>,并对变形镜的主要参数性能进行了测试<sup>[52]</sup>。中科院光电技术研究所和国防科技大学合作研制了 20 单元双压电片变形镜<sup>[53]</sup>,并进行了性能测试与应用研究<sup>[54]</sup>,图 17 为其实物图。



图 17 20 单元双压电片变形镜

Fig. 17 20-element bimorph deformable mirror

在国外,CILAS 为欧洲南方天文台研制了多套双压电片变形镜,在自适应光学系统中的一个成功应用就是为 SUBARU 望远镜研制的 188 单

元变形镜,图 18 给出了该变形镜的实物图和电极排布图,该变形镜使 SUBARU 望远镜达到了衍射极限<sup>[55]</sup>。文献[32]给出了 CILAS 研制的双压电片变形镜的性能指标及相关参数的计算方法。

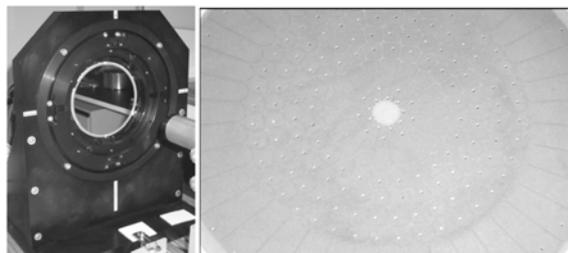


图 18 188 单元双压电片变形镜及电极排布图

Fig. 18 188-element bimorph deformable mirror and its electrode geometry

受压电片弯曲形变特性的影响,双压电片变形镜的空间分辨率(即单元数)难以提高,一般就在几百单元量级<sup>[56]</sup>。但是,通过对材料、结构设计等的优化,双压电片变形镜的校正量可以做大,从而适用于校正大的低阶波像差,如用在人眼的眼底成像<sup>[57]</sup>和激光光束整形<sup>[58]</sup>方面。图 19 是一个由美国 AOptix 公司研制的用于校正人眼较大幅值的低阶波像差的双压电片变形镜,其通光口径为 10 mm,促动器数量为 37 个,最大校正量为  $\pm 18 \mu\text{m}$ 。



图 19 37 单元大行程双压电片变形镜

Fig. 19 37-element bimorph deformable mirror with large stroke

## 2.5 MEMS 变形镜

### 2.5.1 MEMS 变形镜的基本原理

MEMS 是 20 世纪 80 年代迅速发展起来的一门综合性新兴多学科交叉技术。它包括微能源、微驱动器、微传感器、微控制器和微操作器等,集

成一个微小的空间,可实现一种或多种设定的功能。MEMS 变形镜就是用类似电子芯片光刻技术制成的含有多个微小校正单元的变形镜。根据制作方法的的不同,MEMS 变形镜有两种实现形式,一种是类似薄膜变形镜的校正器,如图 20 所示<sup>[59]</sup>,文献[60]中介绍了该类型 MEMS 校正器的制作过程;另一种是表面微机械加工的校正器<sup>[61]</sup>,类似分离促动器变形镜,如图 21 所示<sup>[62]</sup>。

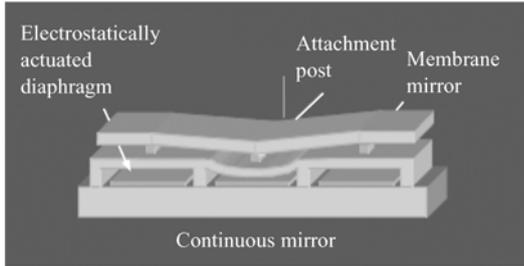


图 20 基于 MEMS 技术的薄膜变形镜  
Fig. 20 Membrane deformable mirror based on MEMS

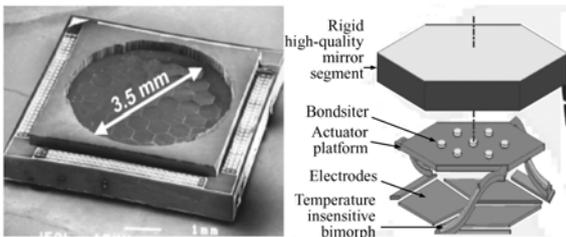


图 21 拼接式 MEMS 变形镜  
Fig. 21 MEMS segmented deformable mirror

2.5.2 MEMS 变形镜的技术发展现状

国际上 MEMS 变形镜的主要研究单位有美国空军研究实验室 (AFRL)、美国 Boston 大学精密工程研究实验室 (PERL)、Texas Instrument 公司、加州大学 Berkeley 分校,以及荷兰的 OKO Technologies 公司等。目前,美国在 MEMS 变形镜方面的研究水平在国际上处于领先地位。国内在这方面与国外存在较大差距,清华大学、华中科技大学等近 10 所大学和相关研究所相继成立了 MEMS 研究机构,并在 MEMS 基础上对加工微型的变形镜进行了一些有益的尝试,取得了一定的成果<sup>[63]</sup>。

图 22 为华中科技大学研制的一种新型的带透明电极的可变形反射镜<sup>[64]</sup>,该变形镜的最大优

点就是可以产生两个方向的形变,在较小的驱动电压下能产生  $-14 \mu\text{m}$  的最大形变,也能产生  $+5 \mu\text{m}$  的形变,甚至更大,也就是说变形镜的最大变形量可以达到  $19 \mu\text{m}$ 。图 23 为 Boston 大学精密工程研究实验室为 Gemini South 望远镜制作的 4 096 单元 MEMS 变形镜<sup>[65]</sup>,每个单元尺寸为  $400 \mu\text{m}$ ,其最大变形量能够达到  $3 \mu\text{m}$ ,工作带宽达到  $2.5 \text{ kHz}$ 。

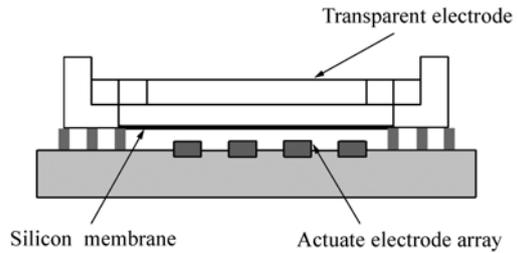


图 22 带透明电极可变形反射镜示意图  
Fig. 22 Schematic drawing of MEMS deformable mirror with transparent electrodes

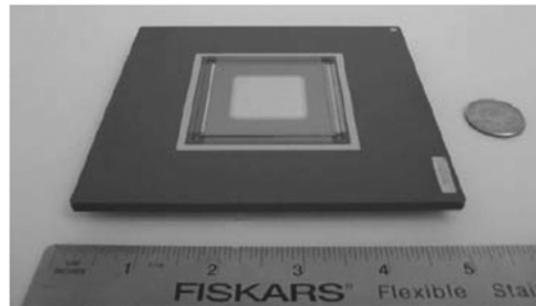


图 23 波士顿微机械加工中心研制的 4096 单元 MEMS 变形镜  
Fig. 23 4096-element MEMS deformable mirror fabricated by Boston Micromachines Corporation

MEMS 变形镜在自适应光学系统中的应用也取得了较好的效果,向东等人利用图 22 中的 MEMS 变形镜构建了视网膜成像自适应光学平台,对黄斑中心凹周围的毛细血管进行了清晰成像<sup>[66]</sup>。南京航空航天大学的李邦明等人利用 OKO 的 37 单元 MEMS 变形镜构建了一套视网膜细胞显微镜系统,并实现了对活体人眼视网膜细胞成像<sup>[67]</sup>。文献[68]介绍了一套基于 MEMS 变形镜的自适应光学实验系统,并在望远镜上完成了对低轨目标的较高分辨率成像。

基于 MEMS 技术的变形镜在国内外研究机构的努力下,取得了较好的效果,但是目前还存在一些主要问题:(1)静电驱动 pull-in 现象的存在使 MEMS 变形镜的校正行程有限;(2)MEMS 工艺牺牲层释放后的残余应力使变形镜的初始面形较差;(3)多单元数的 MEMS 变形镜需要研究能够与其有效集成在一起的集成控制电路,传统的电路板控制将会很难实现。这些是深入研究与应用 MEMS 变形镜的难点及急需解决的关键问题。

## 2.6 基于液晶技术的空间光调制器

### 2.6.1 相位调制的基本原理

前面介绍的波前校正器都是通过控制光程差进行光学相位补偿,而液晶空间光调制器是通过控制折射率来调制波前相位。这是由于液晶材料具有电控双折射效应,光入射到液晶层,被分为 e 光和 o 光,对应的折射率分别是非寻常光折射率  $n_e$  和寻常光折射率  $n_o$ 。当给液晶层施加电压时,电场作用下液晶分子会发生偏转,且不同电压对应于不同液晶倾角:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - 2\arctan(e^{-V}) . \quad (4)$$

e 光的折射率  $n_e$  会随所加电压的大小而改变:

$$n_{e(V)} = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \sin^2 \theta + n_o^2 \cos^2 \theta}} . \quad (5)$$

当垂直于液晶层表面施加电压,保持入射光的偏振方向平行于液晶光轴时,液晶空间光调制器就能够对入射光产生纯相位调制<sup>[69]</sup>:

$$\delta = 2\pi d(n_{e(V)} - n_o) / \lambda , \quad (6)$$

式中: $d$  为液晶层厚度, $\lambda$  为入射光波长。

### 2.6.2 液晶空间光调制器的技术发展现状

液晶空间光调制器作为一种新型的波前校正器件,具有校正单元多、价格低廉、制作周期短和校正准确度高等优势,目前已成为国内外的研究热点<sup>[70-71]</sup>。中科院长春光机所对液晶空间光调制器及其应用进行了多方面的研究,利用液晶空间光调制器搭建了自适应光学实验系统,在对水平大气扰动校正<sup>[72-73]</sup>、视网膜血管成像<sup>[74]</sup>和天文目标成像<sup>[75-76]</sup>等多方面取得了较好的成果。文献<sup>[68]</sup>中报道了利用液晶空间光调制器作为波前校正器实现了对国际空间站的自适应光学校正

成像。液晶空间光调制器应用中的主要限制因素是需要偏振光入射、校正频率低和色散等。随着科技的发展,这些问题将会被逐一解决<sup>[77]</sup>。

## 2.7 自适应次镜

1998 年,美国著名的具有 6 个镜筒的多镜面望远镜(Multiple Mirror Telescope, MMT)被改造成为一个单镜面 6.5 m 口径的望远镜。2003 年,在这个望远镜上,一个新的自适应光学的变形次镜调试成功<sup>[78]</sup>,这是自适应光学变形镜面的一个重要进展。利用次镜本身作为变形镜的最大好处是大大减少了反射或者透射面的数量,提高了望远镜的效率。据文献报道,这个装置减少了在其它的自适应光学系统中所需要的 8 个镜面。

图 24 给出了该自适应次镜的结构图,它由 6 自由度平台、支撑架、制冷夹板、音圈促动器、参考背板和薄变形镜片组成。其中,6 自由度平台用于实现对次镜整体的姿态调整,支撑架上有电控箱实现对镜面面形的控制,制冷夹板除了用于促动器的定位之外,还有水制冷管道用于对音圈电机及其驱动电路的制冷,参考背板用于给薄镜片提供稳定的参考面。与其它的变形镜面不同,这个次镜的变形依靠电磁力来实现,在薄镜面的背后共胶粘着 336 个永磁体,每个永磁体对应有一个线圈,构成一个音圈促动器,线圈和永磁体的距离为 0.2 mm,当线圈中加上电流以后,就有力施加在薄镜面上,实现对面形的校正<sup>[79]</sup>。

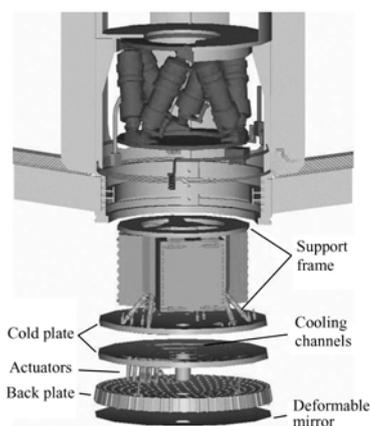


图 24 MMT336 单元自适应次镜结构图

Fig. 24 Structure diagram of 336-element secondary deformable mirror of MMT

在MMT的自适应次镜取得成功之后,大双筒(Large Binocular Telescope, LBT)望远镜也研制了两个672单元的自适应次镜,并在MMT次镜的基础上进行了多方面的改进<sup>[80]</sup>。图25为第一个LBT自适应次镜<sup>[81]</sup>。

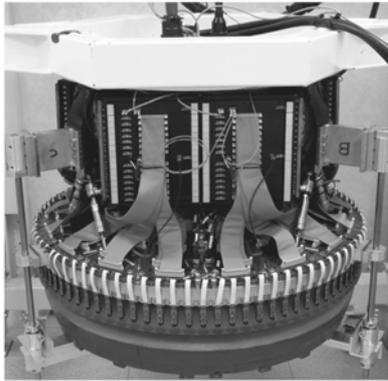


图25 672单元LBT自适应次镜

Fig. 25 672-element deformable secondary mirror of LBT

### 3 波前校正器技术发展展望

波前校正器不仅可作为自适应光学系统的核心部件,在天文望远镜以及空间对地详查相机上也得到了应用,近年来还成功地在光束净化、光束整形、激光腔内像差校正以及医学人眼像差的检测与校正等方面得到了应用。

分离促动器连续镜面变形镜具有技术成熟、可靠性高、工作带宽高等优点,目前仍然是天文望远镜自适应光学系统中使用最多的波前校正器,而且随着压电陶瓷材料及加工工艺的改进和提高,目前已经能够研制小促动器间距、高密度的促动器阵列。欧洲南方天文台正在研究利用该技术实现40 m极大望远镜(ELT)的自适应四镜,而且,基于此主动变形校正技术的空间望远镜也是目前的研究热点。目前,国内1 000单元量级以下的变形镜技术上已经较为成熟,但是对于更大口径望远镜的需求,要求更高密度、口径更大的变形镜,就需要在系统集成、薄变形镜片的加工、陶瓷工艺等方面开展进一步的研究。

由于拼接子镜波前变形镜子镜之间有缝隙,需要复杂的共相位调整,而且单元数难以做得很

多,镜面较大,目前使用很少。

薄膜和双压电晶片变形镜表面弯曲变形的特性决定了其校正单元数不能太多,而且薄膜变形镜受薄膜特性的影响,整体的谐振频率不能做到很高,所以它们一般适合在宽的空间频率范围内校正大幅值的低阶波像差,例如应用在人眼像差校正中。

MEMS变形镜由于具备可以实现系统的小型化、成本适中、响应速度快和能够批量生产等特点,而在军用和民用科学仪器方面具有巨大的潜在市场,而且,MEMS技术与电子技术有很好的兼容性,能够实现高度的技术集成。但是,MEMS变形镜尺寸较小,在很多需要大光学口径的系统中应用受到限制,而且,现在MEMS能够实现的镀膜范围有限、很难得到好的面形质量,另外还存在衍射现象等<sup>[46]</sup>,这些都暂时限制了MEMS变形镜在自适应光学系统中的成熟发展,非常期待技术的进一步创新。

虽然液晶校正器还存在一些问题,但是,目前液晶校正器所取得的一些成果还是很值得肯定的。它的低成本、单元数较多、可以用于透射模式等特点令人们相信其应用会随着材料、工艺等技术的发展和存在问题的逐渐解决而越来越广泛。

自适应次镜是针对大型望远镜的实际需要而构建的系统,涉及大口径薄非球面镜面( $a/h$ 比达500)的加工与面形控制等关键的光学、机械及电控技术。目前,国外在这方面技术相对较为成熟,而且也很好地实现了其科学目标。但是,国内尚未研制出自适应次镜,需要在薄非球面镜面加工、稳定支撑、促动器及电控等方面继续研究、实验,以满足将来大型望远镜的可能需求。

综上所述,波前校正器是自适应光学系统中的关键部件,其性能的好坏直接影响系统的校正能力。目前,有上述多种校正器得到了实际的应用和验证,并取得了较好的效果,但是,由于各校正器的不同特点决定了它们有各自最适用的系统,在系统设计时应予以考虑。而且,随着应用需求的进一步提升,一方面可以通过材料、工艺等的技术进步来提高各波前校正器的技术性能,另一方面可以通过不同性能间校正器的相互配合(例如,校正大幅值低阶像差的校正器与校正小幅值

高阶像差的校正器配合使用等)来实现系统要求,而这些都需要在技术和理论上的进一步创新才能实现。

#### 参考文献:

- [1] BABCOCK H W. The possibility of compensating astronomical seeing[J]. *Publication of the Astronomical Society of the Pacific*, 1953, 65(386):229-236.
- [2] SEIFERT L, LIESENER J, TIZIANI H. The adaptive shack-hartmann sensor[J]. *Opt. Commun*, 2003, 216:313-319.
- [3] IGLESIAS I, RAGAZZONI R, JULIEN Y, et al. . Extended source pyramid wave-front sensor for the human eye[J]. *Opt. Express*, 2002, 10:419-428.
- [4] RODDIER N. Algorithms for wavefront reconstruction out of curvature sensing data[J]. *SPIE*, 1991, 1542:120-129.
- [5] HARDY J W. *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes*[M]. New York:Oxford University Press, 1998:154-164.
- [6] SPINHIME J M, ALLEN G J, AMEER G A, et al. . The starfire optical range 3.5 m telescope adaptive optical system[J]. *SPIE*, 1998, 3353:22-33.
- [7] 郑文佳, 王春鸿, 姜文汉, 等. 基于脉动阵列的自适应光学实时波前处理机设计[J]. *光电工程*, 2008, 35(5):44-49.  
ZHENG W J, WANG CH H, JIANG W H, et al. . Design and analysis of real-time adaptive optics wavefront processor based on systolic array[J]. *Opto-Electron Eng.*, 2008, 35(5):44-49. (in Chinese)
- [8] DUNCAN T S, VOAS J K, EAGER R J, et al. . Low-latency adaptive optical system processing electronics[J]. *SPIE*, 2003, 4839:924-934.
- [9] 贾建禄, 王建立, 赵金宇, 等. 基于 FPGA 的自适应光学系统波前处理机[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8):1716-1722.  
JIA J L, WANG J L, ZHAO J Y, et al. . Adaptive optical wavefront processor based on FPGA[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8):1716-1722. (in Chinese)
- [10] DAYTON D, BROWNE S. Characterization and control of a multi-element dual-frequency liquid crystal device for high speed adaptive optical wave front correction[J]. *Appl. Opt.*, 2001, 40(15):2345-2355.
- [11] TYSON R K. *Principles of Adaptive Optics*[M]. 3rd. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [12] MARK A EALEY. Active and adaptive optical components: the technology and future trends[J]. *SPIE*, 1991, 1543:2-34.
- [13] HARDY J W. *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes*[M]. New York:Oxford University Press, 1998:186-192.
- [14] HAUNG L H, RAO CH H, JIANG W H. Modified Gaussian influence function of deformable mirror actuators[J]. *Opt. Express*, 2008, 16(1):108-114
- [15] EALEY M A, WELLMAN J. Fundamentals of deformable mirror design and analysis[J]. *SPIE*, 1989, 1167:66-84.
- [16] 姜文汉. 自适应光学技术[J]. *自然杂志*, 2006, 28(1):7-13.  
JIANG W H. Adaptive optical technology[J]. *Chinese J. Nature*, 2006, 28(1):7-13. (in Chinese)
- [17] 姜文汉, 吴旭斌, 凌宁, 等. 37 单元自适应光学系统[J]. *光电工程*, 1995, 22(1):38-45.  
JIANG W H, WU X B, LING N, et al. The adaptive optical system with 37-element deformable mirror[J]. *Opto-Electron Eng.*, 1995, 22(1):38-45. (in Chinese)
- [18] 饶长辉, 姜文汉, 张雨东, 等. 云南天文台 1.2 m 望远镜 61 单元自适应光学系统[J]. *量子电子学报*, 2006, 23(3):295-302.  
RAO CH H, JIANG W H, ZHANG Y D, et al. . 61-element adaptive optical system for 1.2 m telescope of Yunnan Observatory[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2006, 23(3):295-302. (in Chinese)
- [19] 姜文汉, 王春红, 凌宁, 等. 61 单元自适应光学系统[J]. *量子电子学报*, 1998, 15(2):193-199.  
JIANG W H, WANG CH H, LING N, et al. . 61-element adaptive optical system[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 1998, 15(2):193-199. (in Chinese)
- [20] WEI K, ZHANG X J, XIAN H, et al. First light on the 127-element adaptive optical system for 1.8 m telescope[J]. *Chinese Opt. Lett.*, 2010, 8(11):1019-1021.

- [21] 林旭东,刘欣悦,王建立,等. 基于干涉仪测量的变形镜面形展平标定研究[J]. 光子学报,2012,15(2):193-199.  
LIN X D, LIU X Y, WANG J L, *et al.*. Study on the flatten calibration of the deformable mirror based on the measurement of the interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 15(2):193-199. (in Chinese)
- [22] 林旭东,刘欣悦. 97 单元变形镜研制报告[R]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2010.  
LIN X D, LIU X Y. Research report of 97-element deformable mirror[R]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
- [23] 林旭东,刘欣悦,王建立,等. 137 单元变形镜性能测试及校正能力的实验研究[R]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2012.  
LIN X D, LIU X Y, WANG J L, *et al.*. Performance test and experimental study of the correction capability of the 137-element deformable mirror[R]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [24] DEKANY R, WLLACE K, BRACK G, *et al.*. Initial test results from the Palomar 200" adaptive optics system[J]. *SPIE*, 1997, 3126:269-276.
- [25] MERKLE F, HUBIN N. Adaptive optics for the European Very Large Telescope[J]. *SPIE*, 1991, 1542:283-292.
- [26] LENA P. Astrophysical results with the come on plus adaptive optics system[J]. *SPIE*, 1994, 2201:1099-1109.
- [27] SPINHIME J M, AMEER G A. Adaptive optics using the 3.5 m starfire optical range telescope[J]. *SPIE*, 1997, 3126:257-268.
- [28] A mirror to correct light distortion[EB/OL]. (2012-02-05) [2012-01-11]. www.cilas.com/mirrors-adaptatifs/sam-mirrors.pdf.
- [29] OPPENHEIMER B R, PALMER D, DEKANY R, *et al.*. Investigating a Xinetics Inc. deformable mirror[J]. *SPIE*, 1997, 3126:569-579.
- [30] LOWRET W H, WYNIA J L, EALEY M A. Characterization of three advanced deformable mirrors[J]. *SPIE*, 1998, 3433:388-393.
- [31] SPINHIRNE J M, AMEER G A. Adaptive optics using the 3.5 m starfire optical range telescope[J]. *SPIE*, 1997, 3126:257-268.
- [32] SINQUIN J C, LURCON J M, GUILLEMARD C. Deformable mirror technologies for astronomy at CILAS[J]. *SPIE*, 2008, 7015:701501.
- [33] SHAKLAN S, GREEN J, MOODY D. Residual wave front phase estimation in the Lyot plane for the eclipse coronagraphic telescope[J]. *SPIE*, 2002, 4860:42-51.
- [34] HULL T, TRAUER J, MACENKA S, *et al.*. Examination of specific telescope constraints and optimum architectures for very high contrast eclipse imagery of extra-solar planets[J]. *SPIE*, 2002, 4860:49-57.
- [35] MARK EALEY. High density deformable mirrors to enable coronagraphic planet detection[J]. *SPIE*, 2004, 5166:172-179.
- [36] DEKANY R. Innovative deformable mirror for Palomar Observatory[J]. *SPIE Newsroom*, 2010, 10. 1117/2. 1201002. 002633.
- [37] HARDY J W. *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes*[M]. New York: Oxford University Press, 1998:192-196.
- [38] HULBURD W G, BARRETT T K, CUELLAR L, *et al.*. High bandwidth long stroke segmented mirrors for atmospheric compensation[J]. *SPIE*, 1991, 1543:64-75.
- [39] PRICE T R, EALEY M A. Adaptive tertiary mirror for segmented mirror control[J]. *SPIE*, 2004, 5166:157-164.
- [40] YELLIN M. Using membrane mirrors in adaptive optics[C]//Proc. of the Seminar in: Imaging through the Atmosphere, Reston, Va., March 22-23, 1976:97-102.
- [41] HARDY J W. *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes*[M]. New York: Oxford University Press, 1998:204-206.
- [42] 张鹏,金光,石广丰,等. 空间薄膜反射镜的研究发展现状[J]. 中国光学与应用光学,2009,2(2):91-101.  
ZHANG P, JIN G, SHI G F, *et al.*. Current status and research development of space membrane reflectors[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2009, 2(2):91-101. (in Chinese)

- [43] HAMELINCK R, ROSIELLE N, KAPPELHOF P, *et al.*. Large adaptive deformable membrane mirror with high actuator density[J]. *SPIE*, 2004, 5490:1482-1492
- [44] TAKAMI H. Membrane deformable mirror for SUBARU adaptive optics[J]. *SPIE*, 1994, 2201:762-767
- [45] LOKTEV M, SOLOVIEV O, VDOVIN G. *Adaptive Optics Product Guide*[M]. 2nd. Netherlands: Flexible Optical BV, 2006.
- [46] PATERSON C, MUNRO I, DAINTY C. A low cost adaptive optics using a membrane mirror[J]. *Opt. Express*, 2000, 6: 175-185.
- [47] FEMANDEZ E J, IGLESIAS I, ARTAL P. Closed-loop adaptive optics in the human eye[J]. *Opt. Lett.*, 2001, 26(10): 746-748.
- [48] SANTANA L D, TORTI C. Benefit of higher closed loop bandwidths in ocular adaptive optics[J]. *Opt. Express*, 2003, 11(20): 2597-2605.
- [49] MANSELL J D, HENDERSON B G, ROBERTSON G. Evaluation of polymer membrane deformable mirrors peak power laser machining applications[J]. *SPIE*, 2010, 7816:78160D.
- [50] FOBORBES, RODDIER F, POCZULP G, *et al.*. Segmented bimorph deformable mirror[J]. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1989, 22(6): 402-405.
- [51] 杨强, 曹根瑞. 13单元双压电晶片变形反射控制电极的优化设计[J]. 光学技术, 1996(5): 15-20.  
YANG Q, CAO G R. The optimization design of control electrode pattern for the 13-segment bimorph mirror[J]. *Opt. Technology*, 1996(5): 15-20. (in Chinese)
- [52] 曹根瑞, 杨强. 13单元双压电晶片变形反射镜主要性能参数的测试[J]. 光学技术, 1996(4): 25-29.  
CAO G R, YANG Q. The measurements of some important performance of 13-segment bimorph deformable mirror[J]. *Opt. Technology*, 1996(4): 25-29. (in Chinese)
- [53] 周虹, 宁禹, 官春林, 等. 双压电片变形反射镜样镜的设计与研制[J]. 光学学报, 2009, 29(6): 1437-1442.  
ZHOU H, NING Y, GUAN CH L, *et al.* Design and fabrication of prototype of bimorph deformable mirror[J]. *Acta Opt. Sinica*, 2009, 29(6): 1437-1442. (in Chinese)
- [54] 宁禹. 双压电片变形反射镜的性能分析与应用研究[D]. 湖南: 国防科学技术大学研究生院, 2008.  
NING Y. Performance test and application study of a bimorph deformable mirror[D]. Hunan: Graduate School of National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [55] OYA S, BOUVIER A, GUYON O, *et al.*. Performance of the deformable mirror for Subaru LGSAO[J]. *SPIE*, 2006, 6272:62724S.
- [56] HARDY J W. *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes*[M]. New York: Oxford University Press, 1998: 197-201.
- [57] JONES S M, OLIVIER S, CHEN D, *et al.*. Adaptive optics ophthalmologic systems using dual deformable mirrors[J]. *SPIE*, 2007, 6467:64670H.
- [58] VERPOORT S, RAUSCH P, WITTRUCK U. Characterization of a miniaturized unimorph deformable mirror for high power cw-solid state lasers[J]. *SPIE*, 2012, 8253:825309.
- [59] PERREAULT J A, BIFANO T G, LEVINE B M, *et al.*. Adaptive optic correction using microelectromechanical deformable mirrors[J]. *Opt. Eng.*, 2002, 41(3): 561-566.
- [60] VDOVIN G V, SARRO P M. Flexible mirror micromachined in Silicon[J]. *Appl. Opt.*, 1995, 34:2968-2972.
- [61] DOBLE N, YOON G, CHEN L, *et al.*. The use of a microelectromechanical mirror for adaptive optics in the human eye[J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27:1537-1539.
- [62] HELMBRECHT M A. *Wavefront Correction*[M]. Samta Crua: CfAO AO Summer School, 2006
- [63] 向东, 王青玲, 张光勇, 等. 可变形反射镜的研究进展及应用[J]. 半导体光电, 2006, 27(6): 659-663.  
XIANG D, WANG Q L, ZHANG G Y, *et al.*. Recent progress and application for deformable mirrors[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, 27(6): 659-663. (in Chinese)
- [64] 向东, 陈海清, 王青玲. 带透明电极可变形反射镜的研制[J]. 光电子·激光, 2006, 16(6): 678-683.  
XIANG D, CHEN H Q, WANG Q L. Fabrication of deformable mirror with transparent electrode[J]. *J. Optoelectronics*

- Laser*,2006,16(6):678-683. (in Chinese)
- [65] COMELISSEN S A, BIERDEN P A, BIFANO T G. A 4096 element continuous facesheet MEMS deformable mirror for high - contrast imaging[J]. *SPIE*,2008,6888:68880V
- [66] 向东,王青玲,杜秋娇,等. 自适应光学技术获取高分辨率视网膜图像[J]. 半导体光电,2008,29(1):135-139.  
XIANG D, WNAG Q L, DU Q J, *et al.*. High-resolution retinal imaging with adaptive optics[J]. *Semiconductor Optoelectronics*,2008,29(1):135-139. (in Chinese)
- [67] 李邦明. 基于微机械薄膜变形镜的像差校正技术及其应用研究[D]. 江苏:南京航空航天大学 研究生院,2010.  
LI B M. Technology and application of aberration correction based on Micromachined membrane deformable mirror[D]. Jiangsu:The Graduate School of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, College of Mechanical and Electrical Engineering,2010. (in Chinese)
- [68] DAYTON D, GONGLEWSKI J, RESTAINO S. MEMS adaptive optics for high resolution imaging of low earth orbit satellites[J]. *SPIE*,2004,5490:1514-1525.
- [69] 张洪鑫,张健,吴丽莹,等. 液晶空间光调制器用于波前校正的研究[J]. 红外与激光工程,2008,37(6):1062-1065.  
ZHANG H X, ZHANG J, WU L Y, *et al.*. Wavefront correction using liquid crystal spatial light modulator[J]. *Infrared and Laser Eng.*,2008,37(6):1062-1065. (in Chinese)
- [70] LOVE G D. Wave-front correction and production of Zernike modes with a liquid crystal spatial light modulator[J]. *Appl. Opt.*,1997,36(7):1517-1524.
- [71] 刘永军,宣丽,胡立发,等. 相位可控液晶空间光调制器的研究[J]. 光子学报,2005,34(12):1799-1802.  
LIU Y J, XUAN L, HU L F, *et al.*. The investigation of controllable phase liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*,2005,34(12):1799-1802. (in Chinese)
- [72] 穆全全,曹召良,李大禹,等. 平行光管气流扰动的液晶自适应光学校正[J]. 光子学报,2008,37(5):1020-1023.  
MU Q Q, CAO ZH L, LI D Y, *et al.*. Liquid crystal adaptive optics system to compensate turbulence in collimator[J]. *Acta Photonica Sinica*,2008,37(5):1020-1023. (in Chinese)
- [73] MU Q Q, CAO ZH L, LI D Y, *et al.*. Open-loop correction of horizontal turbulence; system design and result[J]. *Appl. Opt.*,2008,47(23):4297-4301.
- [74] 程少园. 视网膜血管的液晶自适应光学成像系统设计[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2010.  
CHENG SH Y. Design of liquid crystal adaptive optical system for fundus blood vessel imaging[D]. Changchun:Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,2010. (in Chinese)
- [75] 曹召良,穆全全,胡立发,等. 600mm 望远镜液晶自适应系统成像光路设计[J]. 光学学报,2008,28(6):1147-1150.  
CAO ZH L, MU Q Q, HU L F, *et al.*. Design on liquid crystal adaptive optical system for 600 mm telescope[J]. *Acta Optica Sinica*,2008,28(6):1147-1150. (in Chinese)
- [76] CAO ZH L, MU Q Q, HU L F, *et al.*. Preliminary use of nematic liquid crystal adaptive optics with a 2.16-meter reflecting telescope[J]. *Optics Express*,2009,17(4):2530-2537.
- [77] HARDY J W. *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes*[M]. New York:Oxford University Press,1998:206-210.
- [78] BRUSA G, RICCARDI A, WILDI F P. MMT adaptive secondary: first AO closed loop results[J]. *SPIE*,2003,5169:26-36.
- [79] MARTIN H M, BURGE J H, VECCHIO D, *et al.*. Optical fabrication of the MMT adaptive secondary mirror[J]. *SPIE*,2000,4007:502-507.
- [80] GALLIENI D, ANACLERIO E, GLAZZARINI P, *et al.*. LBT adaptive secondary units final design and construction[J]. *SPIE*,2003,4839:765-772.
- [81] BIASI R, GALLIENI D, SALINARIC P, *et al.*. Contactless thin adaptive mirror technology: past, present and future[J]. *SPIE*,2010,7736:77362B.
- [82] 张景旭. 国外地基光电系统空间目标探测的进展[J]. 中国光学与应用光学,2009,2(1):10-16.

ZHANG J X. Progress in foreign ground-gased optoelectronic detecting system for space target detection[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2009, 2(1):10-16. (in Chinese)

[83] 韩昌元. 空间光学的发展与波前传感技术[J]. *中国光学与应用光学*, 2008, 1(1):14-24.

HANG CH Y. Progress in space optics and wave front sensing technique[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2008, 1(1):14-24. (in Chinese)

作者简介:林旭东(1982—),男,福建莆田人,博士,助理研究员,主要从事自适应光学波前校正器方面的研究。

E-mail:linxudong\_82@126.com

薛 陈(1985—),男,四川成都人,博士,工程师,主要从事电子对抗方面的研究。E-mail:108229672@qq.com

刘欣悦(1973—),男,辽宁大连人,博士,副研究员,主要从事自适应光学及图像处理与分析方面的研究。

E-mail:sirliuxy@sina.com

王建立(1971—),男,山东曲阜人,博士,研究员,博士生导师,主要从事空间目标探测技术、地基高分辨率成像光电望远镜总体技术等方面的研究。E-mail:wangjianli@ciomp.ac.cn

卫沛锋(1984—),男,山西运城人,硕士,助理研究员,主要从事自适应光学、大气光学等方面的研究。

E-mail:weipeifeng@gmail.com

## 《发 光 学 报》

—EI 核心期刊 (物理学类; 无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊,曾于1992年,1996年,2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”,并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年;美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文;2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊;2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中,《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊,A4开本,144页,国内外公开发行。国内定价:40元,全年480元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地 址:长春市东南湖大路3888号

《发光学报》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)86176862, 84613407

E-mail:fgxbt@126.com

国内统一刊号:CN 22-1116/04

国际标准刊号:ISSN 1000-7032

国内邮发代号:12-312

国外发行代号:4863BM

http://www.fgxb.org