

# 微变形反射镜技术应用及发展

陈力子 关小伟 张 政

(63655 部队, 新疆 乌鲁木齐 841700)

**摘要** 变形反射镜是用于自适应光学中波前校正的重要元件, 它能产生可控的波面校正量对波面相位加以校正。但随着自适应光学技术的发展, 传统变形反射镜已不能满足微型化、集成化的发展需求, 而基于微机电加工技术的新型变形反射镜的出现解决了传统变形反射镜存在的问题。介绍了微变形反射镜的工作原理, 国内外微变形反射镜技术的发展情况及其在自适应光学中的应用, 并对分立式与连续表面微变形反射镜的校正能力进行了比较分析, 最后阐述了微变形反射镜器件技术展望。

**关键词** 自适应光学; 微变形反射镜; 波前校正; 校正能力

中图分类号 TN256 OCIS 220.4000 230.4685 文献标识码 A

## Development and Application of MEMS Deformable Mirror

Chen Lizi Guan Xiaowei Zhang Zheng

(Army No.63655, Urumchi, Xinjiang 841700, China)

**Abstract** Deformable mirror (DM) is a very important element in adaptive optical system, and it can perform dynamic phase modulation and endow optical system the ability to decrease the influence of dynamic wavefront errors. Deformable mirror of conventional adaptive optics can not satisfy the need of miniaturization and integration, but the deformable micro-mirror based on microelectro-mechanical systems (MEMS) can solve these problems. The theory and development of MEMS-DM and its application in adaptive optics are summarized, the fitting capability of MEMS-DM are discussed. At last, a prospect of MEMS-DM is given.

**Key words** adaptive optics; MEMS deformable mirror; wavefront correction; correction capability

### 1 引 言

自适应光学的概念最初是由美国天文学家 Babcock 于 1953 年提出的, 此后随着大型激光工程及光学系统的发展, 以及相关支撑技术的日益成熟, 20 世纪 70 年代首次实现工程应用, 之后迅速在军事、天文、激光、眼科医学等领域得到广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。传统自适应光学系统通常是由探测器、控制器和校正器三部分构成。变形反射镜作为自适应光学系统重要的波前校正元件, 能在外部控制下实现高速、高精度的光学镜面面形变化、平移或转角, 从而产生可控的波面校正量对波面相位加以校正。

然而传统变形反射镜由于体积大, 控制复杂, 已不能满足自适应光学系统向微型化、集成化的发展需求。随着微机电系统(MEMS)的发展, 20 世纪 90 年代实现微变形反射镜的研制, 这种器件的单元尺寸达到微米级, 可以与光波波长相比拟, 便于仪器小型化, 可以用集成电路的平面工艺制作, 易于批量生产, 价格便宜, 容易制成多阵列元件, 产品性能重复性好, 成品率高, 便于光机电集成, 具有低惯性, 即使在高频工作状态下, 也可以通过较小的力进行精确定位, 此外还具有宽带宽的优点。

收稿日期: 2009-04-17; 收到修改稿日期: 2009-07-03

作者简介: 陈力子(1981—), 男, 工程师, 主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: lzchen1234@yahoo.com.cn

## 2 微变形反射镜工作原理与发展概况

MEMS 是 20 世纪 80 年代迅速发展起来的一门综合性新兴学科。MEMS 包括微能源、微驱动器、微传感器、微控制器和微操作器等，这类系统通常集成于一个微小的空间，实现一种或多种设定的功能。而微变形反射镜(MEMS-DM)正是微机电技术上与自适应光学的完美结合。

微变形反射镜就其驱动方式可分为压电驱动式、电磁驱动式、静电驱动式和热驱动式等<sup>[3]</sup>，其中静电驱动式微变形反射镜虽然存在着变形量小的弱点，但却以其易于集成、响应速度快、加工难度低等优点成为微变形反射镜发展的主流。静电驱动式微变形反射镜单元一般由多晶硅基底、弹性支撑、多晶硅平板及覆盖在多晶硅平板上的金属平板层构成，如图 1 所示。

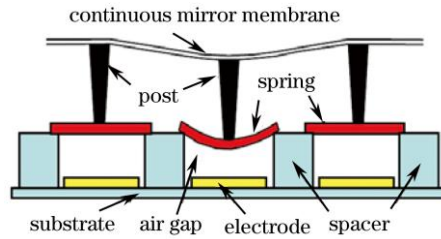


图1 微变形反射镜结构示意图  
Fig.1 General MEMS-DM physical model

对于静电驱动式变形反射镜，静电驱动器的本质就是一种电容结构，它是利用电极板上产生的异种电荷之间的吸引作用来实现静电力。多晶硅平板可视为上电极，多晶硅基底可视为下电极，其共同构成平板式电容器。当下电极施加驱动电压时，引起上电极发生形变，并带动微变形反射镜镜面垂直方向运动，从而实现相位调制。

微变形反射镜单元的控制模型如图 2 所示，其中  $M_{\text{Total}}$  是微变形反射镜一个子单元的总质量， $B_{\text{air}}$  是微变形反射镜中空气阻尼函数， $K_{\text{Total}}$  是总的弹性常数，包括多晶硅平板的弹性常数  $K_s$  及镜面薄膜的弹性常数  $K_m$ ， $f_e$  是静电力，则传递函数<sup>[4]</sup>

$$G(s) = \frac{X(s)}{F_E(s)} = \frac{1}{M_{\text{Total}}s^2 + B_{\text{air}}s + K_{\text{Total}}} \quad (1)$$

在引入谐振频率  $\omega_n$  和阻尼比  $\xi$  后

$$G(s) = \frac{C\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

式中  $X(s)$  与  $F_E(s)$  分别为位移和静电力的拉氏变换式， $C$  为控制常数。

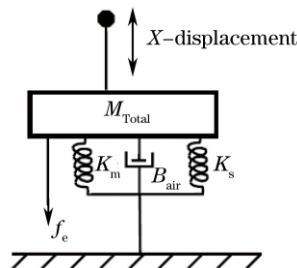


图2 微变形反射镜控制模型  
Fig.2 MEMS-DM controls model

20 世纪 90 年代，许多国家开始对微变形反射镜的技术进行研究，其中，美国在微变形反射镜的研究与制造能力方面处于世界领先水平。国外主要研究单位有美国波士顿大学(Boston Uni.)、波士顿微机械公

司(Boston Micromachines Corporation)、美国空军研究实验室(Air Force Research Laboratory)、艾斯自适应光学公司(Iris AO, Inc.)、德州仪器(Texas Instrument, Inc.)、加州大学伯克利分校(UC Berkeley)、贝克自适应光学(Baker AO, Inc.)公司, 以及荷兰的 OKO 公司(OKO Technologies, Netherlands)等<sup>[1,3,5]</sup>。表 1 为国外生产的几种主要微变形镜的性能参数。

表 1 几种主要微变形反射镜的性能参数

Table 1 Characteristics of MEMS-DMs

Mirrors	Technology	Actuators	Diameter /mm	stroke / $\mu\text{m}$
OKO37	Electrostatic	37	15	0.3~0.6
BMC140	Electrostatic	144	4.4×4.4	1.5
BMC1024	Electrostatic	1024	10.9×10.9	1.5
AOptix35	Bimorph	35	10.2	3,7
MIRAO52	Magnetic	52	15	10~15
Iris AO 37	Electrostatic	3.5	37	5

国内微变形反射镜研究起步较晚, 主要的研究单位有中国科学院光电技术研究所、华中科技大学、西北工业大学、北京理工大学、浙江大学、南京航空航天大学、中国科技大学等。

### 3 微变形反射镜的加工技术

根据硅微加工方法, 微变形反射镜加工技术可分为体硅微机械加工技术和表面硅微机械加工技术。其中体硅微机械加工技术较早地在工程中得到应用, 它主要以硅衬底自身充当结构材料, 通过选择性地去除硅衬底来完成对体硅的三维加工, 从而形成微机械元器件的工艺, 此技术中最关键的步骤是如何去除硅材料的工艺, 通常情况下根据腐蚀原料组成形式的不同可以分为湿法腐蚀(液态)和干法腐蚀(气态), 同时根据腐蚀气液对单晶硅各晶面腐蚀速率的不同还可分为各向同性腐蚀和各向异性腐蚀。

表面硅微机械加工技术是另外一种重要的微机械加工技术, 它是由硅平面工艺发展而来的, 以美国波士顿大学研制的 329 单元分立式微变形反射镜为例<sup>[6]</sup>, 如图 3 所示, 其加工过程为: 首先在衬底上沉积多晶硅驱动电极, 第二步在电极上沉积氧化牺牲层, 并利用光刻技术刻蚀形成一定的图形以确定驱动单元的位置, 接着在牺牲层上沉积第二层多晶硅材料, 在此基础上再沉积第二层牺牲层, 并确定驱动器的位置, 之后沉积第三层多晶硅材料, 最后再将支撑结构层的牺牲层材料用氟化氢溶液腐蚀掉, 并在镜面上完成镀膜工艺, 这样就形成了悬浮可动的微变形反射镜元件。

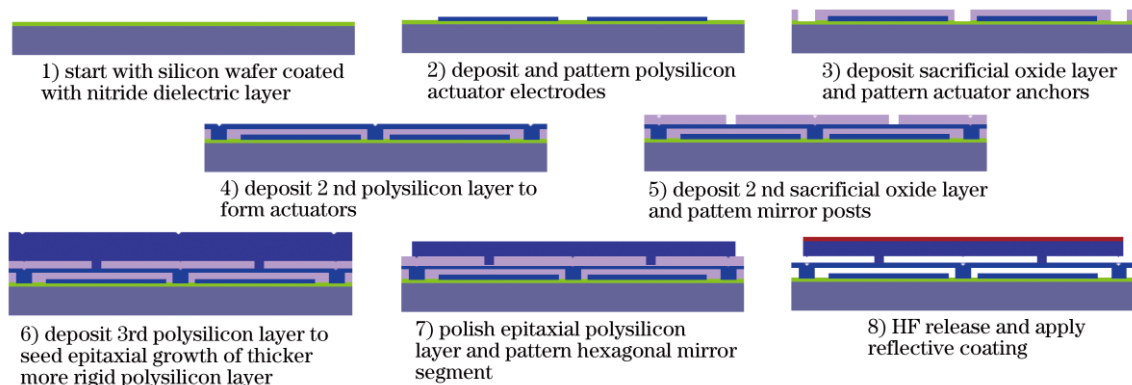


图 3 微变形反射镜加工流程

Fig.3 Micromachining processes for the fabrication of MEMS-DM

在这项技术中最关键的步骤就是牺牲层材料和结构材料的淀积工艺以及牺牲层材料的腐蚀工艺, 除此之外选用合适的牺牲层材料及腐蚀液也是至关重要的, 其选择原则是选用的腐蚀液能快速地腐蚀牺牲层而

同时对上、下方结构层材料的腐蚀则很慢，此两者的腐蚀速率之比越大，结构层受到的影响就越小，从而得到的结构就越精确。

#### 4 微变形反射镜校正能力分析

自适应光学系统是利用变形反射镜拟合误差波前的共轭相位，以补偿误差波前，达到波前误差的校正作用。因此，通常自适应光学系统只对光场复振幅中的相位进行校正，而不能对振幅校正，对系统的校正能力通常是评价系统对波像差相位的校正能力，可以由模式校正残差比  $\sigma_k$  来表示<sup>[7]</sup>。

设误差波面为某一阶泽尼克系数  $k$ ，波前相位的均方根(RMS)值为  $\sigma_{ek}$ ，变形镜校正后的残差波面均方根值为  $\sigma_{rk}$ ，则模式校正残差比为

$$\sigma_k = \frac{\sigma_{rk}}{\sigma_{ek}} \quad (3)$$

(3)式中  $\sigma_k$  表征了自适应光学系统对波像差校正后的残余误差的比重， $\sigma_k < 1$  表示系统对第  $k$  阶模式有校正效果， $\sigma_k = 1$  表示系统对第  $k$  阶模式不起作用， $\sigma_k > 1$  表示系统对第  $k$  阶模式进行校正时反而会更坏。我们分别对子孔径呈矩形和六边形分布的微变形反射镜校正能力进行计算，计算结果如图 4 所示。

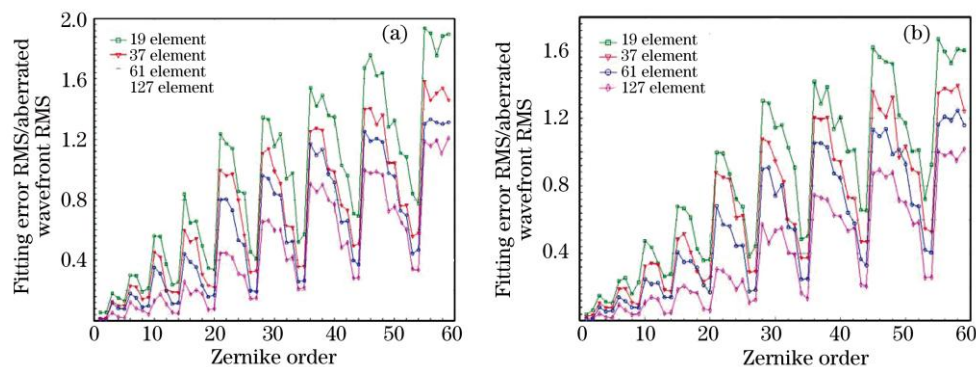


图 4 微变形反射镜适配误差与扰动波前的比值。(a)子孔径矩形分布; (b)子孔径蜂窝形分布  
Fig.4 Fitting error RMS/aberrated wavefront RMS of MEMS-DM. (a) rectangular array; (b) hexagonal array

通过计算结果可以发现，对于相同的畸变模式，子孔径呈六边形的微变形反射镜比矩形分布的微变形反射镜的校正能力略高，而在对畸变波前的泽尼克低阶项校正方面，两种布局的微变形反射镜均有较好的适配能力，但在高阶项的适配结果中，微变形反射镜的拟合残差较大，对部分阶次较高的波前相差甚至没有校正能力，但对高阶像散例外。同时随着单元数的增加，变形镜的分辨率提高，对高阶项的校正能力也略有增强。

此外我们还对微变形反射镜的校正过程进行了仿真，图 5 是 37 单元微变形反射镜校正效果，校正前斯特列尔比约为 0.11，校正后斯特列尔比约为 0.57，光束质量得到提高。

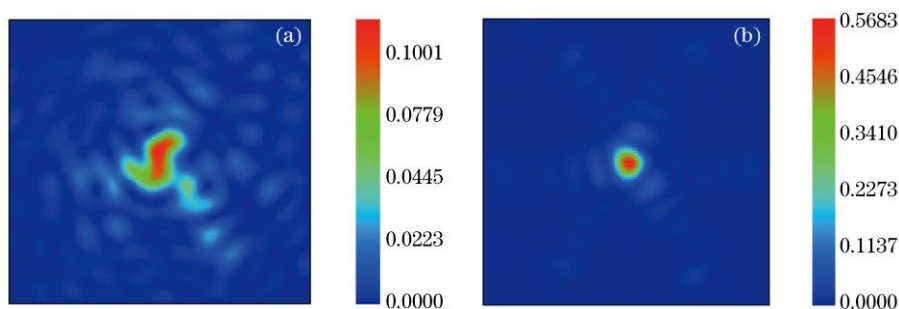


图 5 微变形反射镜校正效果。(a)校正前; (b)校正后  
Fig.5 Compensation performance of MEMS-DM. before (a) and after (b) correction

## 5 微变形反射镜的应用

随着微变形反射镜加工技术的日益成熟,变形镜的单元数已经从几十达到了几千,并在天文观测、光束整形、激光通讯、眼科医学、地面遥感等<sup>[1,2,8]</sup>领域中得到应用。

### 5.1 天文观测

自从 20 世纪 80 年代末,美国在对其自适应光学技术解密后,该技术便被广泛应用于天文观测中以克服大气扰动对天文观测带来的不良影响。尤其在微变形技术得以发展以后,微变形反射镜被应用于不同的天文观测设备中,这些变形镜的面形有连续的、分立的,变形镜子单元数少则几十,多则上千。目前,单元数最多的微变形反射镜是波士顿公司研制的 4096 单元的微变形反射镜<sup>[9]</sup>,该变形镜外观如图 6 所示,其性能指标如表 2 所示(PV 表示峰值),该变形镜将被应用于 Gemini South 望远镜上。此外该变形镜或其改进型也将被应用于美国的 30 m 望远镜<sup>[10]</sup>上。图 7 为 30 m 望远镜后继光路俯视图。

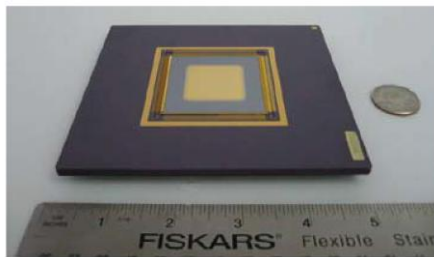


图 6 4096 单元微变形反射镜  
Fig.6 4096-element MEMS-DM

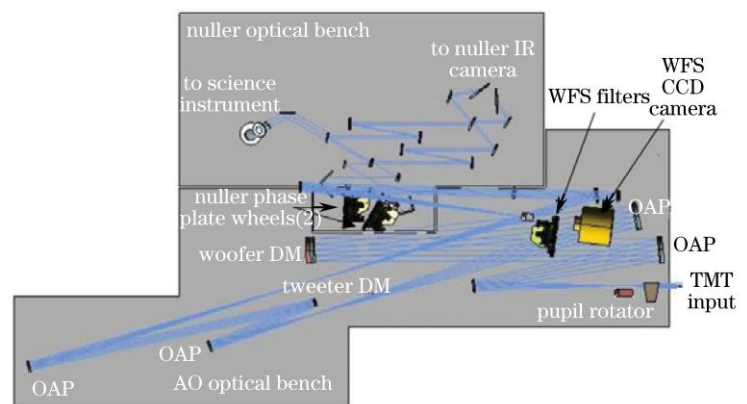


图 7 30 m 望远镜后继光路<sup>[10]</sup>  
Fig.7 Top-view CAD rendering of the PFI optical bench

表 2 4096 单元微变形反射镜的性能参数  
Table 2 4096-element MEMS deformable mirror requirements

Description	Requirement
Pixel count	4096 (64×64 array)
Square pitch / $\mu\text{m}$	400
Stroke	3 $\mu\text{m}$ , after mirror fully flattened to within 70 (RMS)
Fill factor	99%
Active aperture size /mm	19.2 (48 actuator diameter @ 400 $\mu\text{m}$ pitch)
Pixel surface finish (RMS)	<10 nm
Pixel surface finish (PV)	3 times " pixel surface finish (RMS)"
Bandwidth	2.5 kHz
Inter-actuator stroke	1 $\mu\text{m}$
Yield	100% of actuators on a 48 actuator diameter circular aperture function to spec.

### 5.2 激光整形

在激光器中,由于工艺问题往往导致一些不可避免的静态偏差<sup>[11,12]</sup>,这些因素包括:腔镜失调、激活介质本身的缺陷、镜面加工精度等;而对于高功率激光器,除了以上静态偏差以外,还存在着热效应引起的动态偏差。这些偏差共同作用将引起谐振器内模式耦合从而激发多模振荡,使输出激光束的发散角增加,光束质量变差。采用自适应光学技术可对这些偏差进行实时校正。

激光束整形通常可以采用外腔补偿和内腔补偿两种形式,刘良清等采用 Intellite 公司的 37 单元薄膜微

变形反射镜, 实现对固体激光器腔内激光模式的主动补偿, 实验光路图如图 8 所示。实验中初始激光输出模式为  $TEM_{01}$  模, 输出功率为 375 mW; 经过微变形反射镜调节后, 输出模式基本补偿到了  $TEM_{00}$  模, 激光输出功率上升为 875 mW<sup>[13]</sup>。

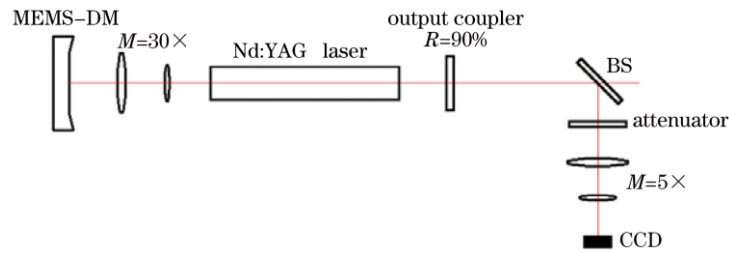


图 8 实验光路图  
Fig.8 Scheme of experiment

### 5.3 无线激光通信

无线激光通信作为一种新型大流量通信手段, 已被各国专家所关注<sup>[14,15]</sup>。在美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory), 科学家采用 Boston Micromachines 公司的 1024 单元微变形反射镜进行了激光通信外场演示实验。此前, 该实验室采用液晶空间光调制器进行了相同的实验<sup>[16]</sup>, 也获得了成功, 但由于受到液晶空间光调制器自身校正频率的限制, 于是改用校正频率更高的微变形反射镜作为校正元件。实验中, 激光光束传输距离约为 1.35 km, 微变形反射镜闭环后, 校正频率达到 800 Hz, 接收端的信号质量提高了约 8 倍<sup>[17]</sup>, 如图 9 所示。

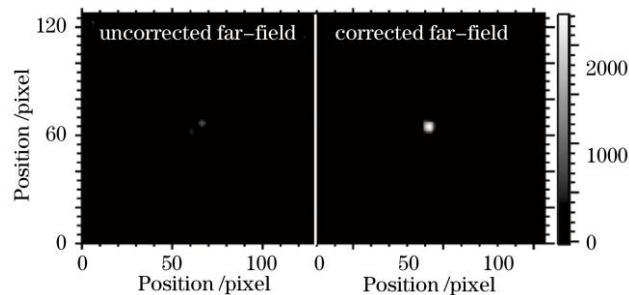


图 9 激光水平传输结果(1.35 km)<sup>[17]</sup>  
Fig.9 Beams after propagation through 1.35 km of atmosphere

### 5.4 眼科医学

微变形反射镜的发明满足了光学仪器小型化、集成化的要求, 同时也使实现具有细胞级高分辨率且能满足实时成像要求的眼底成像技术成为现实, 这对眼科医学研究和临床应用方面都具有巨大价值。

在国内, 中国科学院光电技术研究所于 2000 年建立国际上首套基于整体集成式变形镜的轻小型人视网膜自适应光学系统, 继美国之后获得了视细胞分辨水平的眼底视网膜高分辨图像。并于 2008 年完成人视网膜动态扫描的技术突破, 实现了对活体眼底视网膜的高分辨率(微米量级)、实时(30 f/s)扫描成像<sup>[18]</sup>, 可以在视细胞水平对眼底毛细血管和视觉细胞进行实时观测。国外从事该领域研究的主要单位有美国印第安纳大学<sup>[19]</sup>、加利福尼亚大学<sup>[20]</sup>、休斯顿大学<sup>[21]</sup>等。

### 5.5 显微成像

微变形反射镜除了在眼科医学方面取得成功以外, 还在多种先进的细胞生物医学显微分析仪器中得到成功应用<sup>[22,23]</sup>。2005 年, 伦瑟勒理工学院自动控制技术和系统中心的 Ben Potsaid 等开发了一种自适应扫描光学显微镜(ASOM), 该系统采用了 Boston Micromachines 公司生产的 BMC140 微变形反射镜, 通过变形镜来校正物镜的离轴波前像差。苏格兰的斯特拉思克莱德大学光子研究所则采用荷兰 OKO Technologies

公司的 37 单元微变形反射镜, 研制出了一种新型拉曼显微镜, 该系统可以对观察样品进行断层扫描和成像, 并通过自适应光学技术将之前在生物组织中 100  $\mu\text{m}$  的探测深度提高 200  $\mu\text{m}$  以上<sup>[24]</sup>。

此外, Boston Micromachines 公司也设计了一种光学扫描显微镜, 它与伦瑟勒理工学院设计的不同点在于还增加一个高速倾斜镜, 此外还有一个经特殊设计的扫描透镜, 从而在扩大显微镜视场范围的同时, 保持了高的分辨率。

## 6 结 论

主要介绍了国内外微变形反射镜技术的发展概况, 并对连续表面微变形反射镜的校正能力进行了比较分析, 还介绍了微变形反射镜在各领域中的应用。目前可以预见的是随着微变形反射镜器件设计与加工技术的进展, 将会产生单元数更多、变形范围更大, 更加集成化、廉价化的新型微变形反射镜器件, 而微变形反射镜也将在下一代天文望远镜、地面遥感卫星、太空望远镜、空间光通信系统和医学显微成像系统等方面将发挥重要作用, 其应用领域和适用性都将会得到更大拓展。

## 参 考 文 献

- 1 Harold Dyson, Flavio Pardo, Roland Ryf *et al.*. Closed-loop AO demonstration of MEMS SLM with piston, tip and tilt control[C]. *SPIE*, 2008, **6888**: 68880T
- 2 Toco Yuen Ping Chui, Hongxin Song, Stephen A. Burns. Adaptive-optics imaging of human cone photoreceptor distribution[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(12): 3021~3029
- 3 Nicholas Devaney, Derek Coburn, Chris Coleman *et al.*. Characterisation of MEMs mirrors for use in atmospheric and ocular wavefront correction[C]. *SPIE*, 2008, **6888**: 688802
- 4 R. A. Carreras, D. K. Marker. Proposed adaptive optics control loop for a continuous face sheet, MEMS based deformable membrane mirror[C]. *SPIE*, 2006, **6306**: 630607
- 5 Michael A. Helmbrecht, Min He, Thor Juneau *et al.*. Segmented MEMS deformable-mirror for wavefront correction[C]. *SPIE*, 2006, **6376**: 63760D
- 6 J. B. Stewart, T. G. Bifano, Paul Bierden *et al.*. Design and development of a 329-segment tip-tilt piston mirror array for space-based adaptive optics[C]. *SPIE*, 2006, **6113**: 611300
- 7 Xian Hao. Design and optimum of wave-front sensor for adaptive optical system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008  
鲜 浩. 自适应光学系统波前传感器设计与优化[D]. 成都: 电子科技大学, 2008
- 8 Yoshikazu Hishinuma, Euihyeok Yang. Piezoelectric Unimorph microactuator arrays for single-crystal silicon continuous-membrane deformable mirror[J]. *J. Microelectr-omechanical Syst.*, 2006, **15**(2): 370~379
- 9 S. A. Cornelissen, P. A. Bierden, T. G. Bifano. A 4096 element continuous facesheet MEMS deformable mirror for high-contrast imaging[C]. *SPIE*, 2008, **6888**: 68880V
- 10 Bruce Macintosh, Mitchell Troy, Rene Doyon. Extreme adaptive optics for the thirty meter telescope[C]. *SPIE*, 2006, **6272**: 62720N
- 11 S. Avino, E. Calloni, A. Tierno *et al.*. Adaptive Optics for the control of laser beam in gravitational wave interferometers[J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect A*, 2007, **572**: 518~520
- 12 T. A. Planchon, Jeanphillipe Rousseau, Frédéric Burgy *et al.*. Adaptive wavefront correction on a 100-TW/10-Hz chirped pulse amplification laser and effect of residual wavefront on beam propagation[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **252**(4~6): 222~228
- 13 Liu Liangqing, Yuan Xiao. Study of intracavity aberration compensation of laser mode using membrane deformable mirror[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(5): 718~722  
刘良清, 袁 孝. 微变形镜内腔补偿激光模式畸变研究[J]. *强激光与粒子*, 2007, **19**(5): 718~722
- 14 S. C. Wilks, J. R. Morris, J. M. Brase *et al.*. Modeling of adaptive optics-based free-space communications systems[C]. *SPIE*, 2002, **4821**: 121~128
- 15 Fabio E. Zocchi. A simple analytical model of adaptive optics for direct detection free-space optical communication[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **248**(4~6): 359~374

- 16 K. L. Baker, E. A. Stappaerts, D. Gavel *et al.*. Adaptive compensation of atmospheric turbulence utilizing an interferometric wave-front sensor and a high-resolution MEMS based spatial light modulator[C]. *SPIE*, 2004, **5553**: 269~280
- 17 Steven Menn, Steven A. Cornelissen, Paul A. Bierden. Advances in MEMS deformable mirror technology for laser beam shaping[C]. *SPIE*, 2007, **6663**: 66630M
- 18 [http://www.ioe.ac.cn/chinese/news/news\\_view.asp?id=725&type=8&thetype=1](http://www.ioe.ac.cn/chinese/news/news_view.asp?id=725&type=8&thetype=1)
- 19 Daniel X. Hammer, R. Daniel Ferguson, Chad E. Bigelow *et al.*. Adaptive optics scanning laser ophthalmoscope for stabilized retinal imaging[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(8): 3354~3367
- 20 Yuhua Zhang, Siddharth Poonja, Austin Roorda. Adaptive optics scanning laser ophthalmoscope using a microelectro-mechanical (MEMS) Deformable Mirror[C]. *SPIE*, 2006, **6138**: 61380Z
- 21 Abhiram S. Vilupuru, Nalini V. Rangaswamy, Laura J. Frishman. Adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy for in vivo imaging of lamina cribrosa[J]. *J. Opt. Sol. Am. A*, 2007, **24**(5): 1417~1425
- 22 P. Marsh, D. Burns, J. Girkin. Practical implementation of adaptive optics in multiphoton microscopy[J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(10): 1123~1130
- 23 M. Rueckel, J. A. Mack-Bucher, W. Denk. Adaptive wavefront correction in two-photon microscopy using coherence-gated wavefront sensing[J]. *PNAS*, 2006, **103**(46): 17137~17142
- 24 John M. Girkin, Simon P. Poland, Amanda J. Wright *et al.*. Adaptive optics applied to coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy[C]. *SPIE*, 2008, **6860**: 6860T