



DOI: 10.12086/oe.2020.200337

## 中国科学院光电技术研究所的变形反射镜研究进展

官春林<sup>1,2</sup>, 张小军<sup>1,2</sup>, 邓建明<sup>1,2</sup>, 薛丽霞<sup>1,2</sup>, 张耀平<sup>1,2</sup>, 周虹<sup>1,2\*</sup>, 樊新龙<sup>1,2</sup>,  
程琳<sup>1,2</sup>, 樊峻棋<sup>1,2</sup>, 何刚<sup>1,2</sup>, 牟进博<sup>1,2</sup>, 龙国云<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

<sup>2</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 变形反射镜是自适应光学系统的核心部件, 也是开展自适应光学技术研究的首要研究对象。本文首先介绍了中国科学院光电技术研究所从事自适应光学特别是变形反射镜技术研究的历史背景, 简述了光电所变形反射镜技术早期的发展脉络。然后介绍了光电所研制的变形反射镜在我国历代惯性约束聚变系统中的应用情况, 也介绍了在天文光学观测领域典型的多单元变形镜技术及应用成果, 随后还介绍了应用于生物医学等领域的紧凑型变形反射镜的发展情况和研究现状。最后介绍了光电所在变形反射镜技术新方向的研究情况。

**关键词:** 变形反射镜; 自适应光学; 波前

**中图分类号:** O43; TP273

**文献标志码:** A

**引用格式:** 官春林, 张小军, 邓建明, 等. 中国科学院光电技术研究所的变形反射镜研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(10): 200337

## Deformable mirror technologies at Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences

Guan Chunlin<sup>1,2</sup>, Zhang Xiaojun<sup>1,2</sup>, Deng Jianming<sup>1,2</sup>, Xue Lixia<sup>1,2</sup>,  
Zhang Yaoping<sup>1,2</sup>, Zhou Hong<sup>1,2\*</sup>, Fan Xinlong<sup>1,2</sup>, Cheng Lin<sup>1,2</sup>,  
Fan Junqi<sup>1,2</sup>, He Gang<sup>1,2</sup>, Mou Jinbo<sup>1,2</sup>, Long Guoyun<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Deformable mirror is the core component of the adaptive optics system and the primary research object for the research of adaptive optics technology. In this review, the research history of adaptive optics technology, especially the deformable mirror technologies of IOE is reviewed and the early development of our deformable mirror technology is briefly described. The application of the deformable mirror in the inertial confinement fusion (ICF) system of China is introduced and the typical multi-channel deformable mirror technology and application results in the field of astronomical optical observation is also described. Then we introduce the application of compact de-

收稿日期: 2020-08-28; 收到修改稿日期: 2020-09-26

作者简介: 官春林(1965-), 男, 研究员, 主要从事能动光学器件的研究。E-mail: ckguan@ioe.ac.cn

通信作者: 周虹(1983-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事变形反射镜技术的研究。E-mail: zhouhong@ioe.ac.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

formable mirror in biomedical research. At last, some new research directions of deformable mirror technology are revealed.

**Keywords:** deformable mirror; adaptive optics; wavefront

**Citation:** Guan C L, Zhang X J, Deng J M, *et al.* Deformable mirror technologies at Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(10): 200337

## 1 引言

自适应光学系统的根本作用是将扭曲的波前相位恢复到理想的波前,一个最简单的思路就是引入与扭曲波前互补的波前误差从而达到“抵消”的效果,比如将原本的平面反射镜加工成与入射波前互补的面形就能实现这样的功能。但是实际光学系统中面对的波前误差往往是动态的,靠事先加工成特定形状的“互补”反射镜是不能满足实时性要求的。这就需要一种能够实时改变面形来匹配波前误差的器件,于是催生了变形反射镜(下文简称“变形镜”)这样一种与传统光学元件迥异的特殊器件。根据自适应光学系统的需求,变形镜的面形要以纳米级的分辨率、毫秒级的响应速度实现精确可控的动态变化,其技术难度是非常大的。国外自适应光学研究团队较多,但是真正能够研制实用化变形反射镜的单位相对较少,主要集中在美国<sup>[1-2]</sup>、欧洲<sup>[3-5]</sup>以及俄罗斯<sup>[6]</sup>等。国内中国科学院光电技术研究所(下文简称“光电所”)是最早从事工程化自适应光学技术研究的单位,发展至今已经成为世界上最大的自适应光学研究团队。在关键的变形反射镜技术方面,光电所从1979年开始自适应光学技术研究之初便同步开展技术攻关,至今已40余载,可谓成绩斐然。本文介绍了光电所变形反射镜技术的发展历程、标志性成果及其在典型应用领域的应用现状和技术发展方向。

## 2 变形镜技术的突破

二十世纪六十年代中期,美国在激光技术诞生后不久就开始了自适应光学技术的研究,在1977年左右开始有少量的公开文献报道<sup>[7-8]</sup>,大致介绍了自适应光学的概念及其在大气湍流校正和星体成像补偿方面的初步结果。1979年,由于敏锐地认识到了自适应光学技术具有的巨大应用潜力,光电所姜文汉、凌宁等人决定开始进行自适应光学技术的研究<sup>[9]</sup>。但在当时的条件下要开展实用化的自适应光学技术研究,必须先要攻克一系列关键器件的研制技术难题,这其中首要的便是变形镜的研制技术。当时面对“巴统”协议下

以美国为首的西方发达国家对我国的封锁,从国外采购这一关键器件是绝无可能的,光电所科研人员只有下定决心:要独立自主突破变形镜这一关键器件的研制技术难题,实现从无到有。

在起步初期,光电所研究团队便确立了两条原则:1) 坚持建立自主可控的技术基础,由简单到复杂认真解决单元技术难点;2) 尽量寻找应用目标,在应用中发现和改进问题,在应用中体现价值。以凌宁为代表的科研人员从变形镜驱动结构方式的设计及压电陶瓷材料的选择着手,自学压电材料的基本知识,建立了基础的压电陶瓷性能测量平台。在此基础上又经过长时间测试试验从国内材料中筛选出高线性度、低滞后特性的压电陶瓷材料以及低应力、高强度、高稳定性的粘接剂组分。后续科研团队又相继解决了超薄镜面材料加工工艺、高刚度异型底座研制技术、高光洁度镜面加工工艺等等技术难题。终于在1981年,课题组研制出了中国第一块变形镜-13单元整体压电变形镜<sup>[10-11]</sup>,如图1所示。同年又研制出一块7单元分立式变形镜并于1982年实现了中国首套自适应光学系统的成功闭环,验证了原理和技术路线的正确性<sup>[12]</sup>。

在这之后,随着自适应光学在各个领域大显身手,光电所的变形镜研制技术也得到极大的发展,并且在激光惯性约束聚变、天文目标观测、人眼视网膜成像等领域得到广泛应用,标志性的应用成果包括:1985



图1 我国第一块变形镜实物图

Fig. 1 The first deformable mirror of China

年研制出 19 单元激光光束校正系统并成功应用于“神光 I”激光核聚变装置<sup>[13]</sup>, 成为国际上激光核聚变装置中最早引入的自适应光学系统; 1990 年研制了 21 单元自适应光学系统应用于云南天文台的 1.2 m 天文望远镜, 显著提高了该望远镜的观测分辨能力<sup>[14-15]</sup>; 1998 年研制成功 61 单元自适应光学系统并进行了激光大气传输的补偿实验, 使成像目标上的能量集中度大为提高<sup>[16]</sup>; 1999 年研制了用于“神光 III”激光核聚变原型装置的 45 单元激光光束校正系统<sup>[17]</sup>, 并且之后还为“神光 III”主机装置提供了批量化的自适应光学系统<sup>[18]</sup>。1999 年为北京天文台的 2.16 m 望远镜研制了 21 单元自适应光学系统, 用于天文目标的红外高分辨率成像观测<sup>[19]</sup>; 2009 年研制出 127 单元变形镜用于 1.8 m 自适应光学望远镜的自适应光学系统, 取得了近衍射极限的分辨能力<sup>[20]</sup>; 此外还相继完成了 19 单元和 37 单元人眼视网膜自适应光学成像系统的研制<sup>[21-22]</sup>, 使我国成为继美国之后世界上第二个利用自适应光学技术实现人眼视网膜高分辨力成像的国家。近年来, 光电所在用于空间激光相干通信<sup>[23-24]</sup>和太阳观测望远镜的自适应光学系统方面也获得了丰富的成果<sup>[25-28]</sup>。

### 3 惯性约束聚变领域的应用

二十世纪八十年代初, 光电所刚开始自适应光学研究后不久, 姜文汉和中国科学院上海光学精密机械研究所邓锡铭、范滇元等人就在国际上首先提出: 可以采用自适应光学的方法校正激光核聚变装置的系统像差。为此, 光电所着手研制了 19 单元的分立式变形镜, 如图 2 所示, 并于 1985 年在“神光 I”装置上取得试验成功, 使其激光能量集中度大幅提升, 靶上峰值功率提升了 3 倍, 接近衍射极限。该项研究开创了世界上在激光核聚变装置中成功使用自适应光学技术

改善光束质量的先例。

1999 年开始, 光电所为“神光 III”原型装置的近场相位控制 AO 系统研制了 45 单元、75 mm×75 mm 方形口径的变形镜, 实现了超过 10 个波长的波前校正, 在“神光 III”原型装置第一路上实现主光学系统动态波前误差校正, 将主激光发射时远场峰值能量提高了 3 倍<sup>[29]</sup>; 2007 年, 光电所又为“神光 III”原型装置的 8 路工程化的自适应光学系统提供了批量化的 8 套 80 mm×80 mm 口径的 45 单元变形镜, 如图 3 所示。

到了“神光 III”主机装置阶段, 为满足装置对变形镜提出的大口径需求, 此时美国 NIF 装置<sup>[30]</sup>和法国的 LMJ 装置<sup>[31]</sup>已经开始使用大口径的变形反射镜技术。为了研制我国自己的大口径变形镜, 光电所研究团队提出了一种可拆卸大口径变形镜的结构方案。研究人员在该方案的 17 单元试验样镜(图 4)上全面试验了结构疲劳强度、高反膜系制备、镜面精密组装等工艺技术, 取得了满意的试验结果<sup>[17]</sup>。该方案实现了镜面与驱动结构的分离加工, 使得高损伤阈值的镜面膜系制备具有更少的设计约束, 同时在驱动器失效时也



图 2 用于“神光 I”装置的 19 单元变形镜  
Fig. 2 19-element deformable mirror for SG-I facility

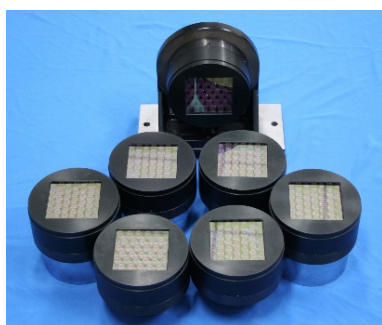


图 3 部分原型装置变形镜实物图  
Fig. 3 Some deformable mirrors for the prototype facility

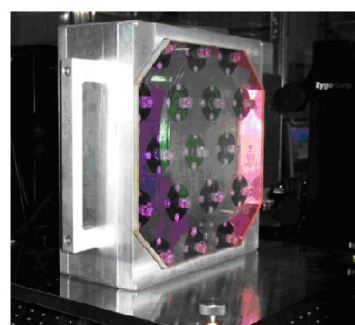


图 4 17 单元可拆卸大口径变形镜试验样镜  
Fig. 4 17-element DM prototype with replaceable actuators



可以进行快速更换,提高了变形镜的可维护性,满足了系统对故障快速响应的工程化要求。

2010 年开始,光电所批量化研制这种大口径可拆卸变形镜,先后为“神光III”主机装置提供了数十套使用这种变形镜的自适应光学系统。其中腔镜变形镜为 39 单元,通光口径为 380 mm×380 mm; 77 单元的投射镜口径达到 453 mm×400 mm<sup>[29]</sup>,是当时光电所研制的最大口径的变形反射镜。几乎同时,光电所还为“神光 II”升级系统提供了 8 块 45 单元、通光口径

368 mm×330 mm 的可拆卸变形反射镜。表 1 是光电所的大口径可拆卸变形镜与美国劳伦斯利弗莫尔实验室(LLNL)在国家点火装置(NIF)上使用的变形镜的性能参数对比,结果表明光电所的变形镜在校正行程和波前像差校正能力等方面优于美国,技术水平上实现了部分赶超。

图 5 是光电所研制的部分大口径可拆卸变形镜的实物图,图 6 是它们在装置系统安装现场的状态。

从 2013 年开始至 2016 年底,光电所陆续为“神

表 1 大口径变形镜技术指标对比

Table 1 Specification of different large aperture DMs

|                           | LLNL 实验室 NIF 1 代 | LLNL 实验室 NIF 2 代 | 光电所                       |
|---------------------------|------------------|------------------|---------------------------|
| 单元数                       | 39               | 39               | 39、45、77                  |
| 通光口径/mm                   | 400×400          | 365×365          | 380×380, 368×330, 453×400 |
| 初始面形 RMS/ $\mu\text{m}$   | —                | —                | <0.1                      |
| 闭环校正面形 RMS/ $\mu\text{m}$ | 0.031            | 0.031            | <0.027                    |
| 驱动器行程/ $\mu\text{m}$      | 4                | 4                | >6                        |
| 可校正 Zernike 模式项数          | 16               | 16               | 20                        |
| 损伤阈值/(J/cm <sup>2</sup> ) | —                | —                | ≥18                       |
| 反射率/%                     | ≥99.5            | ≥99.5            | ≥99.5                     |

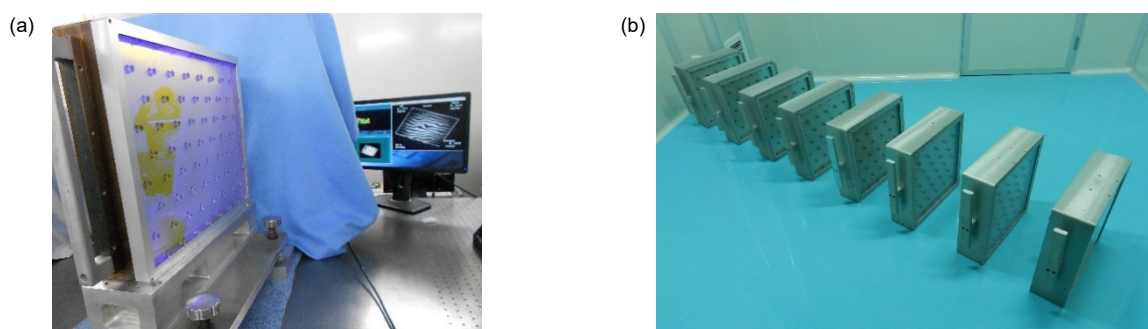


图 5 部分大口径可拆卸变形镜实物

Fig. 5 Some of the large aperture DMs with replaceable actuators

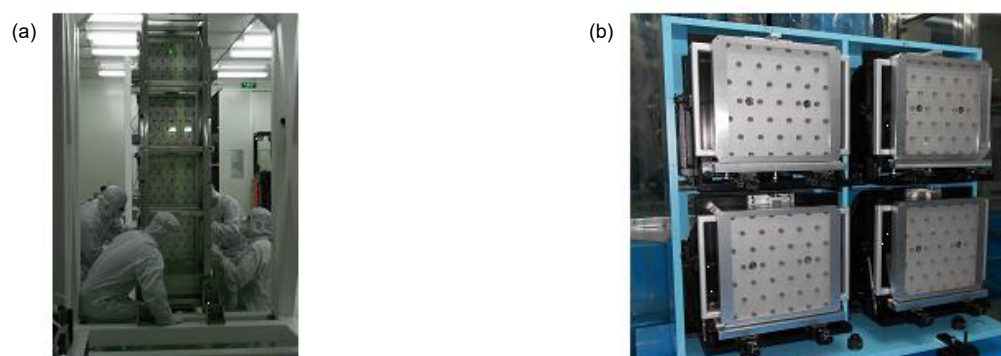


图 6 大口径可拆卸变形镜应用场景

Fig. 6 Large aperture DMs with replaceable actuators in application site

光Ⅲ”主机装置提供了 70 多块大口径可拆卸变形镜。所有变形镜在装置运行过程中都稳定工作，完成了对装置中各种波前畸变的有效控制，改善了光束质量，为装置的聚焦性能达标提供了关键技术支撑。同时，为满足各使用单位的需求，光电所的大口径可拆卸变形镜技术也还在持续朝着更大口径、更多单元数、更高校正精度的方向不断发展。

#### 4 天文光学观测领域中的应用

在完成激光核聚变装置的静态误差校正自适应光学系统的初步研究之后，光电所的科研人员很快就把主要精力集中到大气湍流动态误差校正技术的研究上来。实际上自适应光学在国外最早也是应用于天文光学观测领域，由于国内相关领域技术落后较多，早期并没有明确的需求。直到 1987 年光电所才在中国科学院的支持下开始研制 21 单元自适应光学系统，随后成功实现了 300 m 水平大气通道的大气湍流动态误差的校正。后于 1995 年 9 月相关团队利用该系统在云南天文台首次实现了对星体的大气湍流校正成像，清楚地分辨出未校正前不能分辨的“双星”<sup>[14]</sup>，使我国成为

继美国和欧洲之后世界上第三个实现星体目标实时校正成像的国家，标志着我国在自适应光学领域的研究跃居世界前列。自 2000 年以来，光电所又研制了 61 单元的变形镜(图 7(a))应用到 1.2 m 高分辨力光电成像望远镜中<sup>[32]</sup>；还为 1.8 m 高分辨力光电成像望远镜系统提供了 127 单元的变形镜(图 7(b))，都分别帮助系统实现了优异的校正性能，获得了一批显著成果<sup>[20]</sup>。在 4 m 级光电成像望远镜系统的研制阶段，对变形镜的单元数要求提高到了千单元级别。针对这样的需求，光电所提前部署，重点解决了高稳定性和一致性的压电陶瓷驱动器批量化研制技术、高刚度轻量化底座设计与研制技术、超高展弦比异型薄镜面一体化成型技术等难题，于 2009 年完成了 595 单元变形镜的研制，最终在 2012 年实现了千单元级变形镜的研制(见图 8)。该变形镜有效驱动单元数为 913 单元，通光口径为 288 mm，单驱动器变形量为 $\pm 3 \mu\text{m}$ ，自整平后面形 PV 达到 53.8 nm，RMS 为 4.9 nm(见图 8)。图 9 是 913 单元变形镜生成的典型面形，图 10 是其像差拟合过程中的干涉条纹图。



图 7 61 单元变形镜(a)及 127 单元变形镜(b)

Fig. 7 61-element DM (a) and 127-element DM (b)

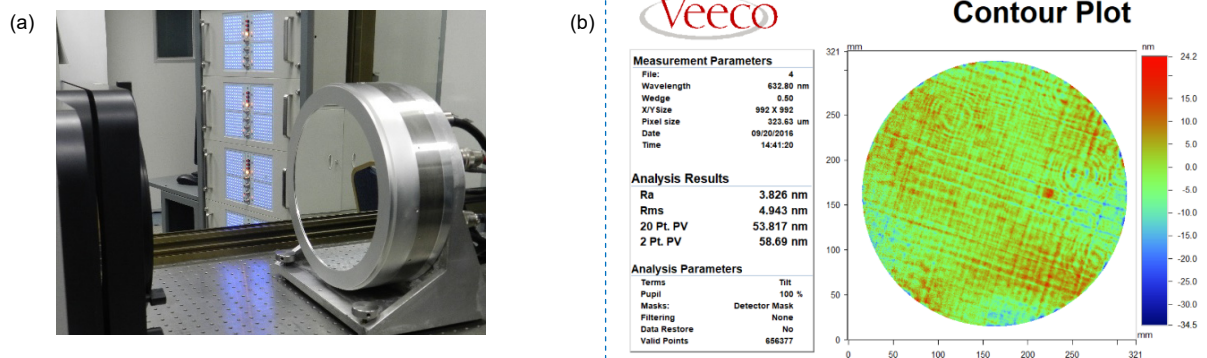


图 8 测试中的 913 单元变形镜(a)及其自校正面形(b)

Fig. 8 913-element DM being tested (a) and its flattened surface map (b)

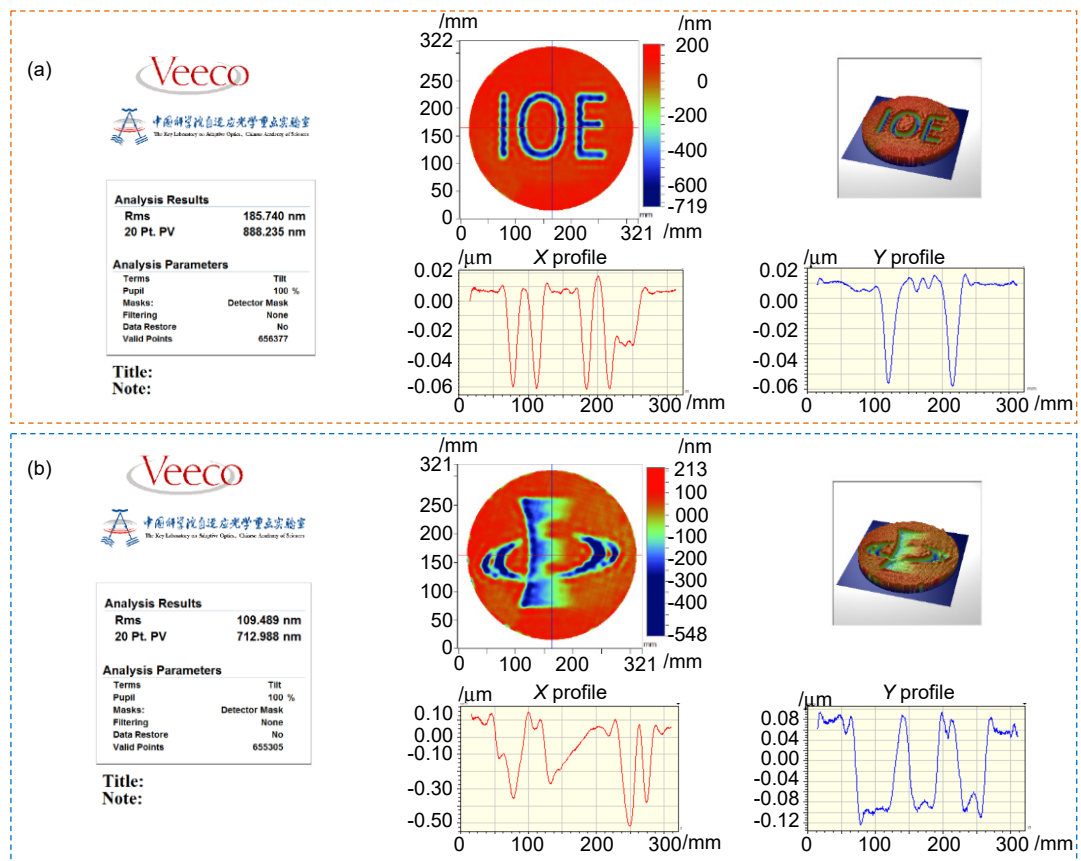


图 9 913 单元变形镜产生的典型面形

Fig. 9 Typic surface maps of 913-element DM

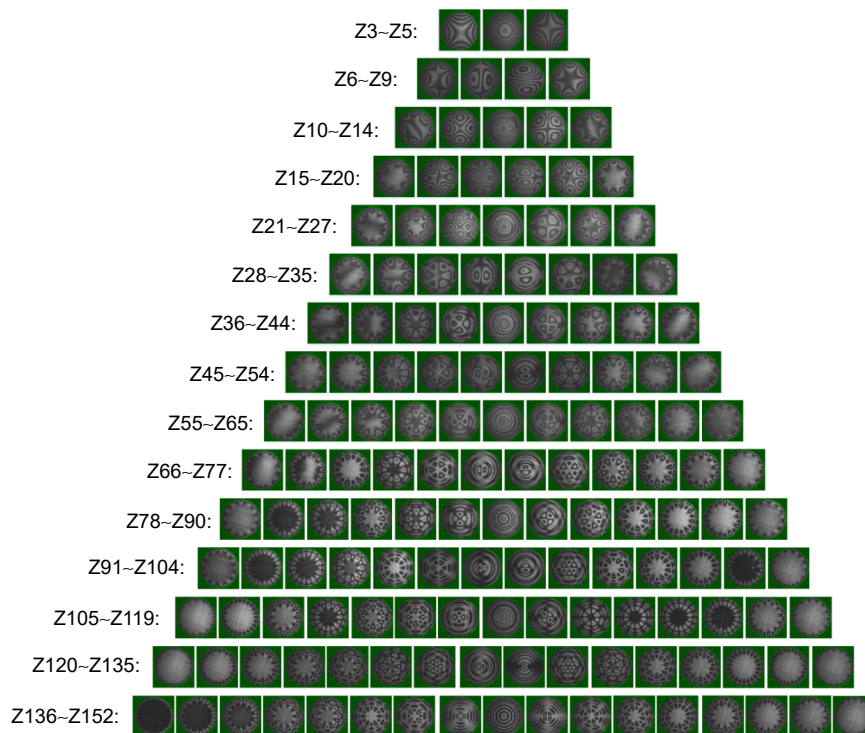


图 10 拟合 Zernike 像差的干涉条纹图

Fig. 10 Interference fringes of Zernike aberration produced by 913-element DM



此外,为了满足自适应光学系统小型化对变形镜提出的高驱动器密度需求,光电所经过多年的努力攻关,提出了一种新型的横向压电效应驱动器结构,并相继突破高密度变形镜整体结构设计、微小型压电驱动器研制等关键技术,形成了独特的高密度多单元变形镜技术路线。在研制出一系列百单元级高密度变形镜并广泛应用于太阳 AO 成像系统<sup>[27-28,33]</sup>以及激光通信系统<sup>[23-24,34]</sup>后(图 11),光电所于 2015 年完成了口径 105 mm、极间距 3 mm、1085 单元的国内单元数最多的高密度变形镜(图 12),相比于之前的 913 单元的变形镜,其口径大大缩小,极大地促进了整体系统设计的紧凑化。该技术也为后续更大规模的自适应光学系统所需的数千甚至上万单元级变形镜研制提供了更为先进的解决方案。

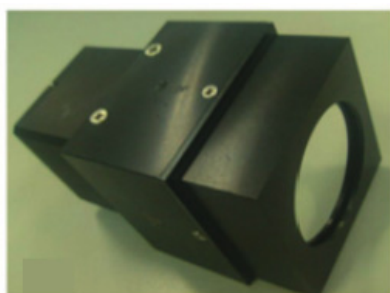


图 11 用于激光通信的 137 单元高密度变形镜<sup>[34]</sup>

Fig. 11 137-element high density DM for laser communication system<sup>[34]</sup>

## 5 生物医学领域的应用

在完成了重大应用领域的验证后,为了将自适应光学技术推广到民用领域,光电所研究团队又瞄准了人眼视网膜高分辨观察的自适应光学技术。1997 年美国罗切斯特大学的 Liang 等人提出可以实时测量并校正人眼像差以获取视网膜图像的方法<sup>[35]</sup>。光电所研究团队随即率先在国内开展了该项技术研究,先后突破微小型变形镜研制、人眼像差高精度测量等关键技术,于 2000 年建立了世界上第一套基于整体集成式微小变形镜的 19 单元人眼视网膜成像自适应光学系统。该系统使用通光口径 20 mm 的 19 单元微小型变形镜,获得可分辨直径为  $3\ \mu\text{m} \sim 4\ \mu\text{m}$  左右视网膜细胞以及视网膜毛细血管图像,分辨率比当时最先进的同类仪器高一个量级,接近人眼衍射极限。之后该系统进一步改进,使用性能更高、口径稍大(35 mm)的 37 单元变形镜(见图 13)并取得了更好的观测结果<sup>[21]</sup>。

在仪器不断完善的过程中,光电所又针对性地研制出了一种新型的双压电片变形镜以满足系统对人眼系统大幅低阶像差的校正需求。从 2010 年开始,光电所科研团队陆续为人眼视网膜系统研制了口径 20 mm 的 9 单元和 35 单元双压电片变形镜<sup>[36-38]</sup>(见图 14)。双压电片变形镜的特点是体积小,控制自由度高,对离焦、像散等低阶像差具有较大的校正能力,它在人眼视网膜成像系统中的应用使得设备的性能取得了突破性的进展<sup>[39]</sup>。光电所科研人员在更新一代的高分辨率成像系统中还加入了 169 单元的高密度变形镜,使得其性能得到了更大的提升。



(b)

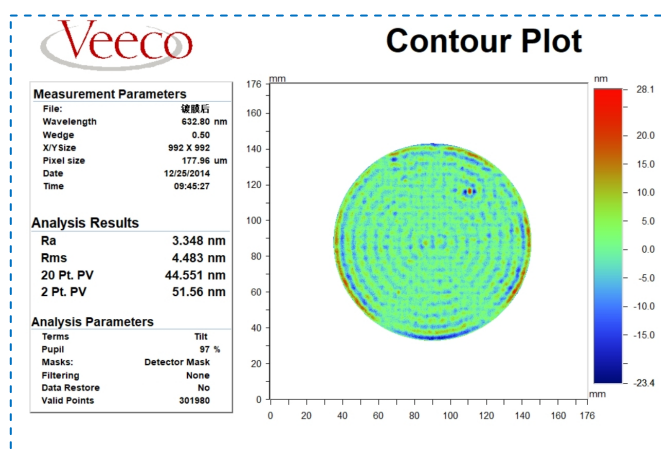


图 12 1085 单元高密度变形镜实物(a)及检测结果(b)

Fig. 12 1085-element high density DM (a) and its flattened surface map (b)



图 13 早期人眼视网膜成像系统使用的  
19 单元、37 单元变形镜<sup>[21]</sup>

Fig. 13 DMs used in early human retinal imaging systems<sup>[21]</sup>



图 14 人眼视网膜成像系统使用的  
9 单元、35 单元双压电片变形镜

Fig. 14 Bimorph DMs used in human retinal imaging systems

## 6 新的方向

### 6.1 大口径变形次镜

近年来,随着高分辨力光学观测系统对系统集成度和光能利用率要求的进一步提高,将望远镜的次镜作为能动器件成为一个有效的技术手段,国外数百单元的变形次镜已经应用到多个大型望远镜系统中并获得了较好的观测结果<sup>[40-41]</sup>。针对这个趋势,光电所采用了不同的技术路线,在发展传统分立式变形镜技术的基础上进行了基于压电陶瓷驱动器的变形次镜的技术研究,所研制成功的第一套 73 单元变形次镜<sup>[42]</sup>在 2017 年成功应用于 1.8 m 望远镜中并取得了优异的观测结果<sup>[43]</sup>。在此基础上,研究团队正在继续研制更大

规模的数百单元变形次镜。该技术为下一代的超大口径望远镜系统提供了更为灵活的自适应光学解决方案。

### 6.2 用于空间光学的轻量化主动光学反射镜

主动光学技术使空间反射镜对于制造误差和热稳定性的要求降低,并且使反射镜具备在轨校正的能力,基于这样的优点使得科研人员对空基自适应光学技术充满了想象力。光电所从 2012 年开始探索了基于轻量化镜面的能动反射镜技术,研制了对角线 300 mm 的六边形样镜,采用三角形蜂窝结构的轻质铝镜面和 42 个压电陶瓷驱动器进行能动控制,测试结果验证了该方案的可行性(如图 17),这也为后续的轻质能动空间反射镜技术提供了有效的技术途径。

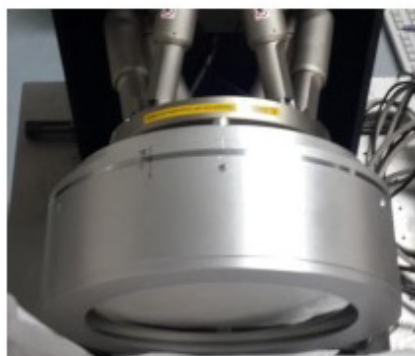


图 15 73 单元变形次镜

Fig. 15 73-element secondary DM



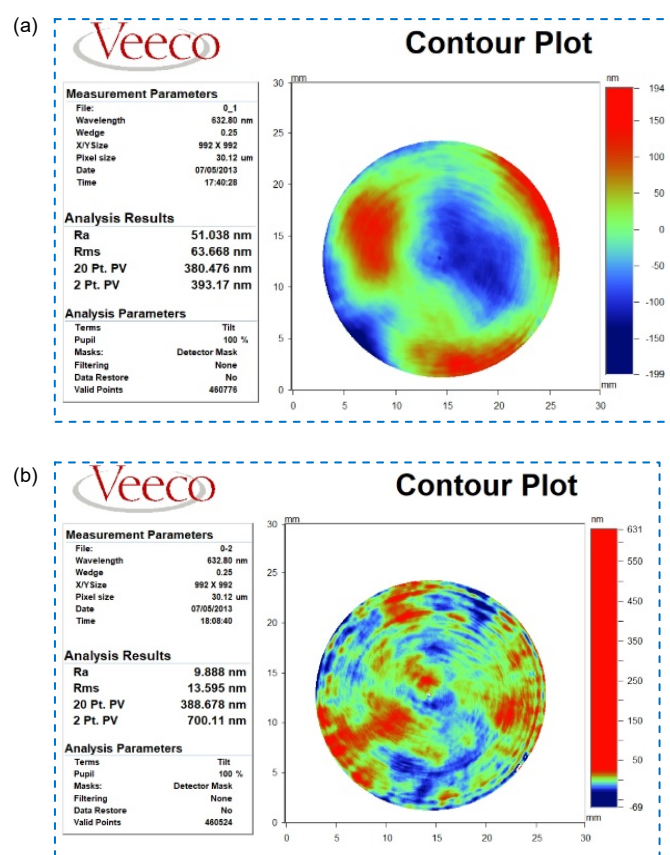


图 16 变形次镜的原始面形(a)及自校正后的面形(b)

Fig. 16 The initial (a) and flattened (b) surface maps of 73-element SDM

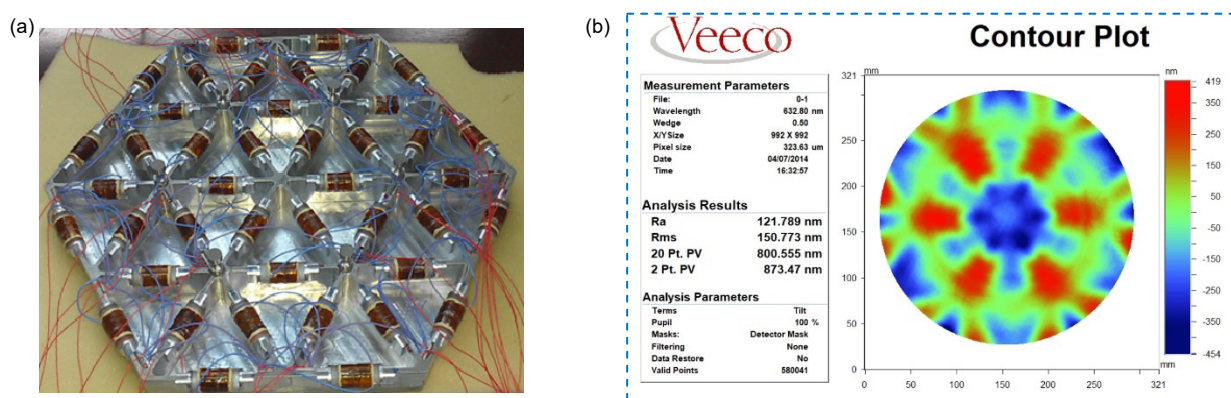


图 17 轻质空间能动镜样镜(a)及其自校正面形(b)

Fig. 17 Space-based light-weight adaptive primary mirror prototype (a) and its flattened surface map (b)

## 7 结 论

光电所的变形镜研究团队以自主技术突破为基础，国家重大需求为牵引，经过数十年的技术发展和完善，建立了具有完全自主知识产权的全套变形镜研

制技术，并且在天文目标观测、激光惯性约束聚变、人眼视网膜成像、空间激光通信、激光光束净化和传输等领域得到广泛应用，累计为各个重大任务领域提供了各种类型、规格的变形镜 400 余台套，可谓是成果卓著。放眼未来，光电所变形镜研究团队还将在坚

持独立自主的基础上进一步追求更大的技术突破, 努力服务于我国的自适应光学事业的发展。

## 致谢

谨以此文纪念我国自适应光学的开拓者、能动光学器件的奠基人凌宁老师。

## 参考文献

- [1] Gaffard J P, Jagourel P, Gigan P. Adaptive optics: description of available components at Laserdot[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, **2201**: 688–702.
- [2] Wirth A, Cavaco J, Bruno T, *et al.* Deformable mirror technologies at AOA xinetics[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, **8780**: 87800M.
- [3] Sinquin J C, Bastard A, Beaufort E, *et al.* Recent results and future DMs for astronomy and for space applications at CILAS[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **9184**: 91480G.
- [4] Charton J, Bitenc U, Curis J F, *et al.* Recent improvements of high density magnetic deformable mirrors: faster, larger and stronger[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **9148**: 914825.
- [5] Fernández E, Artal P. Membrane deformable mirror for adaptive optics: performance limits in visual optics[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(9): 1056–1069.
- [6] Kudryashov A V, Kulakov V B, Kotsuba Y V, *et al.* Low-cost adaptive optical devices for multipurpose applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, **3688**: 469–475.
- [7] Hardy J W, Lefebvre J E, Koliopoulos C L. Real-time atmospheric compensation[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1977, **67**(3): 360–369.
- [8] Hardy J W. Active optics: a new technology for the control of light[C]//*Proceedings of the IEEE*, 1978, **66**: 651–697.
- [9] Jiang W H. Adaptive optics techniques investigations in institute of optics and electronics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1995, **22**(1): 1–13.  
姜文汉. 光电技术研究所的自适应光学技术[J]. *光电工程*, 1995, **22**(1): 1–13.
- [10] Lin N, Zhang Z R. Multielement monolithic piezoelectric deformable mirror (II)—working life of deformable mirror[J]. *Optical Engineering*, 1985(2): 22–28.  
凌宁, 张正荣. 多元整体压电变形反射镜(二)—变形反射镜的工作寿命[J]. *光学工程*, 1985(2): 22–28.
- [11] 凌宁. 多元整体压电变形反射镜(研究阶段进展报告)[J]. *光学工程*, 1982(6): 44–52.
- [12] Jiang W H. Overview of adaptive optics development[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(3): 170489.  
姜文汉. 自适应光学发展综述[J]. *光电工程*, 2018, **45**(3): 170489.
- [13] Jiang W H, Huang S F, Ling N, *et al.* Hill-climbing wavefront correction system for large laser engineering[J]. *Proceedings of SPIE*, 1988, **965**: 266–272.
- [14] Jiang W H, Li M Q, Tang G M, *et al.* The compensated imaging for stars by adaptive optics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1995, **22**(1): 23–30.  
姜文汉, 李明全, 汤国茂, 等. 星体目标自适应光学成像补偿[J]. *光电工程*, 1995, **22**(1): 23–30.
- [15] Jiang W H, Li M Q, Tang G M, *et al.* Adaptive optics image compensation experiment for star objects[J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, **1920**: 381–391.
- [16] Jiang W H, Wang C H, Ling N, *et al.* 61 element adaptive optical system[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, **15**(2): 193–199.  
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.
- [17] Jiang W H, Yang Z P, Guan C L, *et al.* New progress on adaptive optics in inertial confinement fusion facility[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(7): 1625–1634.  
姜文汉, 杨泽平, 官春林, 等. 自适应光学技术在惯性约束聚变领域应用的新进展[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1625–1634.
- [18] Ao M W, Yang P, Yang Z O, *et al.* A method of aberration measurement and correction for entire beam path of ICF beam path[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, **6823**: 68230I.
- [19] Jiang W H, Tang G M, Li M G, *et al.* 21-element infrared adaptive optics system at 2.16-m telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, **3762**: 142–149.
- [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 Optics Letters*, 2010, **8**(11): 1019–1021.  
魏凯, 张学军, 鲜浩, 等. 1.8 m 望远镜 127 单元自适应光学系统首次观测结果(英文)[J]. *中国光学*, 2010, **8**(11): 1019–1021.
- [21] Ling N, Zhang Y D, Rao X J, *et al.* Small table-top adaptive optical systems for human retinal imaging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, **4825**: 99–108.
- [22] Zhang Y D, Jiang W H, Shi G H, *et al.* Application of adaptive optics in ophthalmology[J]. *Science in China: Series G: Physics, Mechanics & Astronomy*, 2007, **37**(S1): 68–74.  
张雨东, 姜文汉, 史国华, 等. 自适应光学的眼科学应用[J]. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2007, **37**(S1): 68–74.
- [23] Chen M, Liu C, Rui D M, *et al.* Performance verification of adaptive optics for satellite-to-ground coherent optical communications at large zenith angle[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(4): 4230–4242.
- [24] Chen M, Liu C, Rui D M, *et al.* Experimental results of atmospheric coherent optical communications with adaptive optics[J]. *Optics Communications*, 2019, **434**: 91–96.
- [25] Rao C H, Jiang W H, Fang C, *et al.* A tilt-correction adaptive optical system for the solar telescope of Nanjing University[J]. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 2003, **3**(6): 576–586.
- [26] Rao C H, Zhu L, Rao X J, *et al.* 37-element solar adaptive optics for 26-cm solar fine structure telescope at Yunnan Astronomical Observatory[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, **8**(10): 966–968.
- [27] Rao C H, Zhu L, Rao X J, *et al.* Second generation solar adaptive optics for 1-m New Vacuum Solar Telescope at the Fuxian Solar Observatory[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, **13**(12): 120101.
- [28] Rao C H, Gu N T, Rao X J, *et al.* First light of the 1.8-m solar telescope—CLST[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2020, **63**(10): 109631.
- [29] Yang Z P, Li E D, Zhang X J, *et al.* Adaptive optics correction systems on Shen Guang III facility[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(3): 180049.  
杨泽平, 李恩德, 张小军, 等. “神光-III”主机装置的自适应光学波前校正系统[J]. *光电工程*, 2018, **45**(3): 180049.
- [30] Zacharias R A, Beer N R, Bliss E S, *et al.* Alignment and wavefront control systems of the National Ignition Facility[J]. *Optical Engineering*, 2004, **43**(12): 2873–2884.
- [31] Ebrardt J, Chaput J M. LMJ project status[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2008, **112**(3): 032005.

- [32] Ling N, Guan C L, Wang L, *et al.* The development of 61-element discrete piezoelectric deformable mirror[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, **10**(4): 200–205.  
凌宁, 官春林, 王岚, 等. 61单元分立式压电变形反射镜的研制[J]. 量子电子学报, 1998, **10**(4): 200–205.
- [33] Rao C H, Zhu L, Zhang L Q, *et al.* Development of solar adaptive optics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(3): 170733.  
饶长辉, 朱磊, 张兰强, 等. 太阳自适应光学技术进展[J]. 光电工程, 2018, **45**(3): 170733.
- [34] Rui D M, Liu C, Chen M, *et al.* Application of adaptive optics on the satellite laser communication ground station[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(3): 170647.  
芮道满, 刘超, 陈莫, 等. 自适应光学技术在星地激光通信地面站上的应用[J]. 光电工程, 2018, **45**(3): 170647.
- [35] Liang J Z, Williams D R, Miller D T. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, **14**(11): 2884–2892.
- [36] Ning Y, Yu H, Zhou H, *et al.* Experimental research on spatial fitting capability to Zernike aberrations of 20-element bimorph deformable mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1756–1760.  
宁禹, 余浩, 周虹, 等. 20单元双压电片变形镜对 Zernike 像差空间拟合能力的实验研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(7): 1756–1760.
- [37] Zhou H, Ning Y, Guan C L, *et al.* Design and fabrication of prototype for bimorph deformable mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1437–1442.  
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.
- [38] Ning Y, Zhou H, Guan C L, *et al.* Finite element analysis and measurement of a 20-element bimorph deformable mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **31**(9): 1638–1642.  
宁禹, 周虹, 官春林, 等. 20单元双压电片变形反射镜的影响函数有限元分析和实验测量[J]. 光学学报, 2008, **31**(9): 1638–1642.
- [39] Zhao L N, Dai Y, Xiao F, *et al.* Adaptive optics vision simulator based on 35 element bimorph deformable mirror[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **9282**: 928237.
- [40] Brusa G, Del Vecchio C. Design of an adaptive secondary mirror: a global approach[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(21): 4656–4662.
- [41] Riccardi A, Brusa G, Salinari P, *et al.* Adaptive secondary mirrors for the Large Binocular Telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, **5169**: 721–732.
- [42] Fan X L, Guan C L, Rao C H. Wave-front fitting capability analysis of 1.8 m telescope's adaptive secondary mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0822002.  
樊新龙, 官春林, 饶长辉. 1.8 m 望远镜变形次镜波前拟合能力分析[J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0822002.
- [43] Guo Y M, Zhang A, Fan X L, *et al.* First light of the deformable secondary mirror-based adaptive optics system on 1.8m telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **9909**: 99091D.



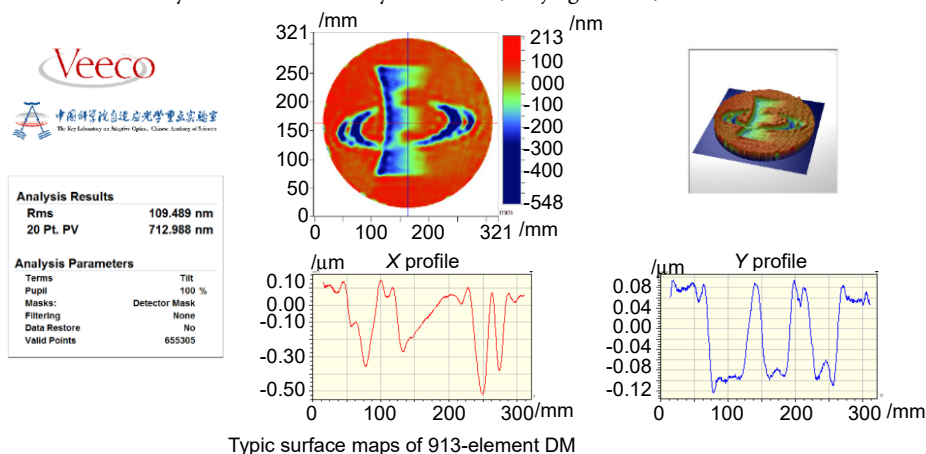
# Deformable mirror technologies at Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences

Guan Chunlin<sup>1,2</sup>, Zhang Xiaojun<sup>1,2</sup>, Deng Jianming<sup>1,2</sup>, Xue Lixia<sup>1,2</sup>, Zhang Yaoping<sup>1,2</sup>, Zhou Hong<sup>1,2\*</sup>, Fan Xinlong<sup>1,2</sup>, Cheng Lin<sup>1,2</sup>, Fan Junqi<sup>1,2</sup>, He Gang<sup>1,2</sup>, Mou Jinbo<sup>1,2</sup>, Long Guoyun<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China



Typical surface maps of 913-element DM

**Overview:** Deformable mirror is a particular optical device which is different from general optical mirror which requires high-quality and stable surface shape, it is precisely to compensate for other aberrations in the optical system by dynamically changing its surface shape. According to the requirements of the adaptive optics system, the surface shape of the deformable mirror needs to achieve precise with nanometer-level resolution and controllable dynamic changes with millisecond-level response speed, which is very technically difficult. There are many adaptive optics research teams, but relatively few of them have the ability of manufacturing practical deformable mirrors, mainly in the United States, Europe, and Russia. The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences (IOE) in China is the earliest team engaged in the research of engineered adaptive optics technology, and has become the world's largest adaptive optics research team. In terms of deformable mirror technology, IOE has carried out synchronization technology research since the beginning of adaptive optics technology research in 1979. It has been more than 40 years and has achieved many remarkable results. The deformable mirror developed by IOE covers many types of structures, with diameters ranging from several millimeters to hundreds of millimeters, and the number of actuator ranges a few to thousands. They are widely used in Chinese inertial confinement fusion system, photoelectric imaging telescope system, and human eye retinal imaging systems, satellite-to-space laser communication system, etc.

This review firstly introduces the historical background of the research on adaptive optics, especially deformable mirror technology by the Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, and briefly describes the early development of our deformable mirror technology, including the first deformable mirror and the first set of adaptive optics system. Then it introduces the application of the deformable mirror developed by IOE in the Chinese inertial confinement fusion system, especially the development of the large-diameter detachable deformable mirror used in the 'Shen Guang III' facility in recent years. It also introduces the typical multi-element deformable mirror technology and application results in the field of astronomical optical observation. Two different technological routes have been formed in the development of thousand-elements deformable mirrors, which fully guarantees the development needs of China's future large-aperture telescopes. Afterwards, the development and research status of compact deformable mirrors used in biomedicine and other fields are introduced, and finally, the research situation of new directions of deformable mirror technology of our institute was introduced.

**Citation:** Guan C L, Zhang X J, Deng J M, *et al.* Deformable mirror technologies at Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(10): 200337

\* E-mail: [zhouhong@ioe.ac.cn](mailto:zhouhong@ioe.ac.cn)