

基于 AlN 的 MEMS 变形镜仿真及驱动性能研究

邵健^{1**}, 李琦¹, 余洪斌^{1,2*}

¹华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;

²深圳华中科技大学研究院, 深圳 518000

摘要 设计了一种基于氮化铝 (AlN) 材料的压电连续面型变形镜, 采用理论分析和 COMSOL 仿真对该 AlN MEMS 变形镜的结构进行了优化, 拟合了前 14 项 Zernike 多项式, 对其驱动性能特别是像差矫正能力进行了系统研究。研究表明, 该变形镜表现出与 COMSOL 工艺相兼容、制备工艺简单且环保的特点, 具有线性控制、大形变量的优势, 满足一般自适应光学系统的要求。

关键词 光学设计; 自适应光学; 变形镜; 氮化铝 (AlN); 驱动性能; Zernike 多项式; 微电子机械系统 (MEMS)

中图分类号 TH744

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.082204

Simulation and Driving Performance of AlN-Based MEMS Deformable Mirror

Shao Jian^{1**}, Li Qi¹, Yu Hongbin^{1,2*}

¹ School of Optical and Electrical Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

² Shenzhen Research Institute of Huazhong University of Science and Technology, Shenzhen 518000, China

Abstract An AlN-based piezoelectric continuous membrane deformable mirror is designed. Based on the theoretical analysis and COMSOL simulation, the structure of AlN MEMS deformable mirror is optimized and the first 14-term Zernike polynomials are fitted. Its driving performances, especially its aberration correction ability, are investigated systematically. The research results show that such a deformable mirror has the advantages of excellent linear control and large deformation. It is compatible with the COMSOL process, and its processing technique is simple and environmentally friendly, which meets the general requirements of self-adaptive optical system.

Key words optical design; adaptive optics; deformable mirror; AlN; driving performance; Zernike polynomial; micro electro mechanical system (MEMS)

OCIS codes 220.4000; 110.1080; 230.4040

1 引言

光束在其产生及传输的过程中, 常常受到诸如大气湍流、光学仪器装配误差、激光增益介质不均匀性等的影响而产生畸变, 光束质量下降^[1]。传统的改进光束质量的方法主要是改进光学设计、细化装配技术等, 然而许多不可预知的因素如重力、大气湍流等, 因其具有随时间不断改变的特性, 其影响无法从根本上消除, 从而严重制约了光学系统性能的提高。

Babcock^[2]首次提出自适应光学概念, 采用闭环校正波前误差的方法来弥补天文视宁度。目前自适应光学技术已在天文学、激光矫正、视网膜成像、光通信等领域起着举足轻重的作用^[3-7]。变形镜作为波前矫正器, 是自适应光学系统中的核心部件, 随着其应用的不断扩展, 小型化、轻量化成为变形镜的一个重要发展方向。在此基础上, 基于微电子机械系统 (MEMS) 的 MEMS 变形镜应运而生。常见的 MEMS 变形镜驱动方式分为静电驱动和压电驱动。静电驱动由于其结构相对简单、功耗低、易于制造及

收稿日期: 2018-03-07; 修回日期: 2018-03-09; 录用日期: 2018-03-19

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (2016JCTD112)、深圳市基础研究计划 (JCYJ20160414102014801)

* E-mail: yuhb@hust.edu.cn; ** E-mail: 760909670@qq.com

工艺集成^[8-10]的优点,受到了广泛的研究。然而,平行板电极之间的“拉入”效应限制了变形镜的有效运动幅度,容易导致设备故障。另外,驱动器所产生的静电力与施加电压的平方成正比,这种非线性关系使得设备控制较为复杂。尽管目前已提出基于静电排斥策略^[11-12]的解决方案,但是受器件结构的复杂度以及制造工艺的限制,这些方案未能得到广泛应用。与此相比,采用压电驱动的变形镜则具有线性控制、快速响应及低功耗等特性。现阶段大多数压电驱动 MEMS 变形镜采用的是锆钛酸铅(PZT)压电陶瓷、铌镁酸铅(PMN)等压电材料^[13-15],虽然压电系数较大,然而这些材料制备过程较复杂,往往需要高温极化工艺且难以实现结构的图形化,因而很难同主流 MEMS 工艺相兼容。同时材料中包含有铅成分,会在器件加工及后续报废处置过程中产生环境污染,从而极大限制了其推广应用。氮化铝(AlN)是近年来开发出的一种新型压电材料,其可通过低温磁控溅射工艺制备而成,且不需要极化处理^[16]。此外,采用基于氯气的干法刻蚀方法可以很容易地对 AlN 进行图形化处理,因而基于 AlN 的压电驱动结构可以很方便地采用 MEMS 工艺制备而成,且其无铅特性很好地切合绿色环保的理念,从而受到了广泛的关注和应用^[17-18]。迄今为止,基于 AlN 的压电驱动结构已被广泛应用于射频(RF)和超声 MEMS 器件上,但将其应用于构建 MEMS 变形镜,目前还鲜有报道。

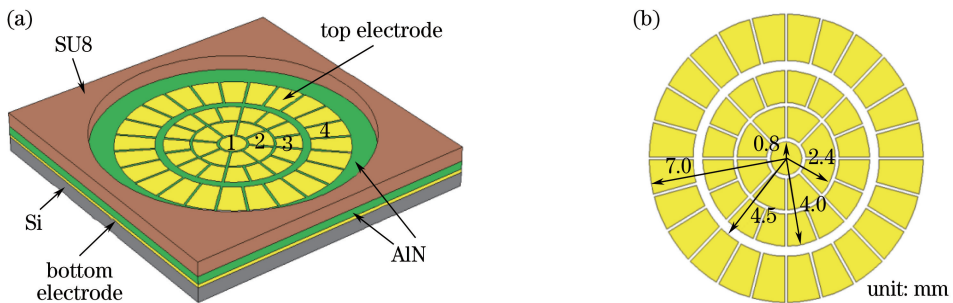


图 1 AlN MEMS 变形镜。(a)结构图;(b)顶电极设计

Fig. 1 AlN MEMS deformable mirror. (a) Structural diagram; (b) design of top electrodes

变形镜的工作原理为:AlN 薄膜加载电压时,产生横向应力,但由于 Si 的固定约束作用,横向应力转变为纵向应变,通过改变电极的极性可以同时获得凸面型和凹面型两种形变结果。因此,对给定镜面口径,AlN 薄膜及硅膜的厚度将直接决定变形镜的最终性能。在进行理论分析时,将器件结构等效为一个四周夹支的圆形板结构,其截面示意图如图 2 所示。

本文设计了一种基于 AlN 的压电连续面型变形镜,通过理论分析和 COMSOL 仿真,对该 AlN MEMS 变形镜的结构进行优化,并对其驱动性能进行了系统研究。着重研究了该变形镜的像差矫正能力,拟合了前 14 项 Zernike 多项式。

2 器件结构设计

基于 AlN 的 MEMS 变形镜结构如图 1(a)所示,其中镜面主体是由硅膜构成,在其上依次沉积底电极、AlN 及顶电极。顶电极设计如图 1(b)所示。一般而言,电极越多,自由度就越多,因而可以矫正更高阶的像差。但增加电极数目往往伴随着引线难度提升,同时也会出现电极之间电场的串扰问题,导致变形面型偏离理想情况。本文旨在拟合前 14 项低阶 Zernike 像差,综合其像差矫正效果以及电极布线工艺难度,采用环形排布共 49 个电极,有效口径为直径 8 mm 的圆形区域。在有效口径外增加一圈宽电极,可以增加变形镜的形变量,另外也可提高 Zernike 像差拟合度^[19]。为获得均匀厚度的圆形硅膜,一般采用深反应离子刻蚀(DRIE),但是 DRIE 对实验环境要求严苛且其设备价格昂贵,从而极大地增加了变形镜的制造成本。为了简化变形镜的制备工艺,采用氢氧化钾(KOH)湿法腐蚀制备出方形膜,用由 SU8 光刻胶制备而成的框架结构来实现对圆形有效镜面工作区域的定义。



图 2 变形镜截面图

Fig. 2 Cross-sectional diagram of deformable mirror

由于电极的厚度相对于压电层和结构层的厚度而言较小,电极厚度对整体结构机械性能的影响可

以忽略不计,在实际分析中只对 AlN/Si 结构进行理论计算。

在中心电极施加电压时所产生的变形镜形变量^[20]为

$$\Delta z = \frac{1}{2}k \frac{a^2}{D} |\mathbf{M}_p| = \frac{1}{2}k \frac{a^2}{D} (e_{31} z_p V), \quad (1)$$

式中 k 为常数,由电极的形状与面积决定; a 为 Si 衬底的半径; \mathbf{M}_p 为压电材料的弯矩; D 为弯矩刚度; e_{31} 取决于 AlN 材料的压电系数; z_p 为中性面到压电材料中心的距离; $V = E \times t_{\text{AlN}}$ 为外加电压,其中 E 为电场强度, t_{AlN} 为 AlN 的厚度。中性面到压电材料中心的距离为

$$z_p = t_{\text{Si}} + \frac{1}{2}t_{\text{AlN}} - z_0, \quad (2)$$

$$z_0 = \frac{\int_0^{t_{\text{Si}}} E_{\text{Si}} z dz + \int_{t_{\text{Si}}}^{t_{\text{Si}}+t_{\text{AlN}}} E_{\text{AlN}} z dz}{E_{\text{Si}} t_{\text{Si}} + E_{\text{AlN}} t_{\text{AlN}}}, \quad (3)$$

式中 z_0 为中性面到硅衬底的距离; E_{Si} 、 E_{AlN} 分别为 Si 与 AlN 材料的杨氏模量,并有 $E_{\text{Si}} = 170 \text{ GPa}$ 、 $E_{\text{AlN}} = 320 \text{ GPa}$; t_{Si} 为 Si 的厚度; z 为距离。弯矩刚度为

$$D = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^N B_i [(h_i - z_0)^3 - (h_{i-1} - z_0)^3], \quad (4)$$

式中 h_i 为第 i 层材料距离衬底的距离; B_i 为第 i 层

的双轴模量; N 为器件的层数,这里 $N = 2$ 。对于晶向 $[100]$ 的硅, $B_1 = 180 \text{ GPa}$,对沿 C 轴生长的 AlN, $B_2 = 350 \text{ GPa}$ 。

图 3(a) 所示为运用 MATLAB 软件拟合得到的在相同电压下 AlN/Si 厚度与变形镜形变量间的关系。由图 3(a) 可知,变形镜的形变量随着 Si 或者 AlN 厚度的减小而呈现出单调递增的趋势。在图 3(a) 中用红色框标示的区域,出现了形变量反转的现象,相应区域的放大图如图 3(b) 所示。结合 (3) 式可知,此时器件的中性面从 Si 层转移到了 AlN 层中,导致在驱动过程中位于中性面以下的 AlN 与位于其上的 AlN 产生抵消作用,从而降低了驱动性能进而减小形变。

相同电场下 AlN/Si 厚度与变形镜形变量间关系的拟合如图 4 所示。在 Si 厚度不变时,形变量随 AlN 厚度的增大先增大后减小,并且随着 Si 厚度的不一样,最大形变量对应的 AlN 厚度也不一样。将图 4(a) 中同一 Si 厚度下曲线上的最高点投影至 Si/AlN 平面,并将所有投影点连接起来,可串联成一条直线,斜率为 0.45,如图 4(b) 所示。由此可知,在相同电场下,为获得变形镜最大形变量,AlN 与 Si 厚度之比应为 0.45。代入 (3) 式中,计算得出中性面位于 Si 衬底中,且高度约等于 Si 衬底厚度的 83%。

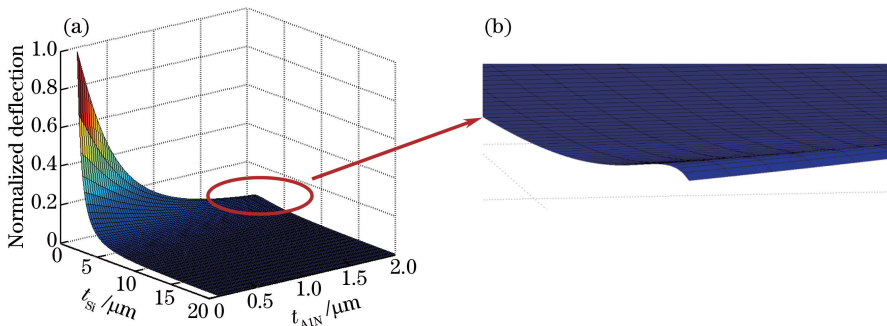


图 3 AlN/Si 厚度比与变形镜形变量。(a) 电压相同时的关系;(b) 形变量反转区域

Fig. 3 Deformation of deformable mirror and AlN/Si thickness ratio. (a) Relationship under same voltage; (b) deformation reversal area

3 驱动性能仿真

由理论分析可知,控制 AlN/Si 厚度之比为 0.45 时,变形镜可以在相同电场强度下获得最大的形变量。当 AlN 沉积厚度超过 $2 \mu\text{m}$ 时,其生长方向偏离 C 轴方向,导致 AlN 的压电性质变差^[21]。基于以上两点,同时考虑到 MEMS 工艺的难易程度,该变形镜的衬底 Si 和压电层 AlN 厚度分别设计为 $10 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m}$ 。器件的详细尺寸以及结构参数如

表 1 所示。为简化分析,采用 COMSOL 中的多物理场模块对变形镜的性能作进一步研究。对实际采用 SU8 框架定义镜面有效区域所获得的有效边界条件和理论分析中所采用的边界固支情况对变形镜性能的影响进行对比分析。图 5(a) 和 5(b) 分别为中心电极施加 60 V 电压时,此两种结构下的镜面变形情况。图 5(c) 为两种结构中心电极施加 60 V 电压时形变的截面轮廓图(只考虑有效口径范围)。由图 5 可知,该设计可以较为完备地复制同尺寸(直径

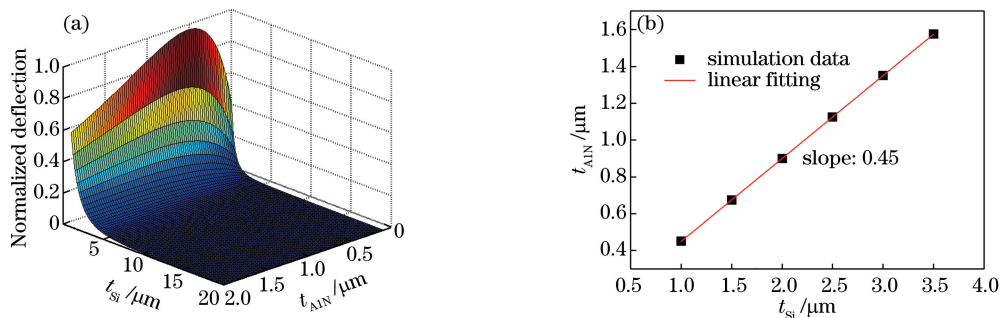


图4 AlN/Si厚度比与变形镜形变量。(a)电场强度相同 AlN/Si厚度与变形镜形变量的关系；
(b)变形镜最大形变量时 AlN 与 Si 厚度比

Fig. 4 AlN/Si thickness ratio and deformation of deformable mirror. (a) Relationship under same electric field;
(b) AlN/Si thickness ratio under maximal deformation of deformable mirror

为 17 mm)圆形膜的形变情况。

表1 变形镜的结构参数

Table 1 Structural parameters of deformable mirror

Parameter	Value
Side length of mirror /mm	17
Diameter of electrodes /mm	14
Thickness of Si / μm	10
Thickness of Al / μm	1
Thickness of SU8 / μm	40
Young modulus of Si /GPa	170
Young modulus of AlN /GPa	350
Young modulus of SU8 /GPa	4.4
Poisson ratio of Si	0.280
Poisson ratio of AlN	0.315
Poisson ratio of SU8	0.220

采用 COMSOL 软件参数化扫描模块,在中心 1 号电极(图 1)上施加 20~100 V 共 5 组电压,间隔 20 V,器件的形变情况如图 6 所示。由图 6 可知,该变形镜具有极佳的线性控制效果。在位于变形镜不同位置处的 4 个单电极上施加 60 V 电压负载时,镜面的轮廓图如图 7(a)所示。内圈 1、2、3 号电极的面积大小一致,电极离中心越远,镜面形变量越小。这主要因为外围电极距离固定约束较近,受到 Si 的固定约束作用更为明显。4 号电极因其面积是 1 号电极的两倍,因而其致动的最大形变量略大于 1 号电极所致动的最大形变量。

4 变形镜像差矫正性能研究

Zernike 多项式常用于描述由大气湍流、光学仪

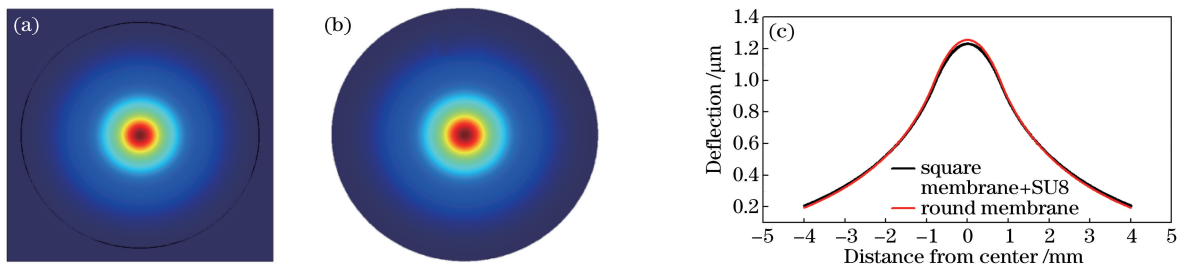


图5 中心电极施加 10 V 电压时的镜面形变和截面轮廓图。(a)方形膜+SU8 框镜面形变图；
(b)圆形膜镜面形变图；(c)两种结构形变的截面轮廓图

Fig. 5 Mirror surface deformation and cross-sectional profile images when central electrode applied with voltage of 10 V.

(a) Image of mirror surface deformation with square film and SU8 frame; (b) image of mirror surface deformation with round film; (c) cross-sectional profile images of deformation of these two structures

器装配误差、激光增益介质不均匀性等因素造成的光线波前畸变,因而变形镜对 Zernike 多项式的拟合程度可以用来表征变形镜的像差矫正效果^[22]。变形镜镜面形貌 φ 为

$$\varphi(\rho, \theta) = \sum_{i=1}^n a_i Z_i(\rho, \theta), \quad (5)$$

式中 a_i 为第 i 项 Zernike 多项式系数, Z_i 为第 i 项 Zernike 多项式, n 为采用的 Zernike 多项式项数, ρ 为径向坐标, θ 为角度坐标。

连续面型变形镜的致动器通过镜面相互耦合,其耦合系数对变形镜的像差矫正性能有很大影响。当耦合系数较低时(小于 5%),各个致动器

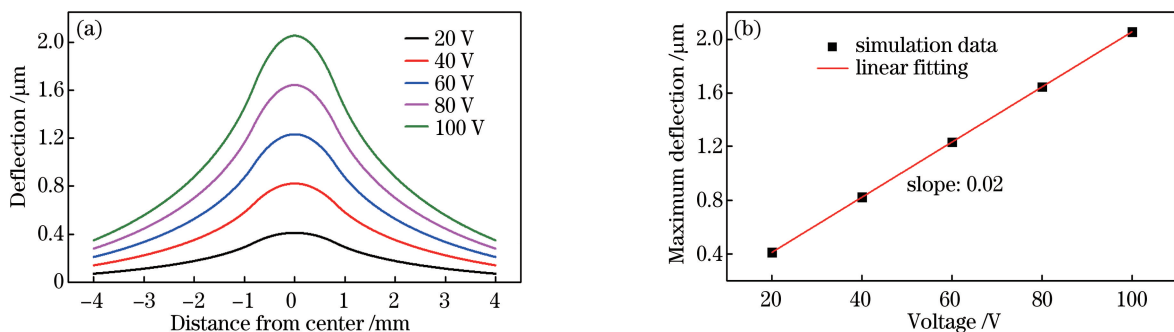


图6 中心电极施加不同电压下的变形镜形变。(a)截面轮廓图;(b)最大形变量

Fig. 6 Deformation of deformable mirror for central electrode applied with different voltages. (a) Cross-sectional profile images; (b) maximum deformation

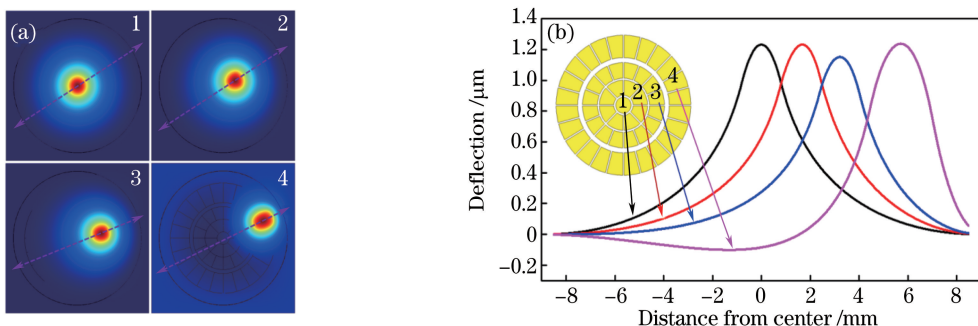


图7 轮廓图。(a) 1~4号电极受60 V电压时镜面的轮廓图;(b)图(a)中沿虚线的镜面截面轮廓图

Fig. 7 Profiles. (a) Mirror surface profiles for No. 1-4 electrodes applied with voltage of 60 V; (b) cross-sectional profiles of mirror along dotted lines in Fig. (a)

处于独立工作状态,这种方式虽然可以较为精确地控制特定区域的形变情况,但是无法实现连续的镜面重构,导致像差矫正性能大为降低。当耦合系数过高(大于50%)时,致动器的驱动力被瓜分,导致变形幅值降低。当耦合系数为15%左右时,可以同时保证像差矫正性能和像差矫正幅值^[23]。经计算,所设计变形镜的致动器耦合系数为24.5%,单个电极驱动的面型如图7(b)所示,满足像差矫正要求。

图8所示为该变形镜拟合出的前14项Zernike像差的面型情况(除了 Z_0 、 Z_1 、 Z_2 三种平动或倾斜模式),其中 d_{PV} 为镜面的形变峰谷值, e_R 为镜面的拟合误差。图9所示为变形镜对第10项Zernike像差矫正情况。图9(a)所示为驱动电压的加载方式,图9(b)所示为COMSOL软件仿真出的该驱动电压组合下镜面的形变图,图9(c)对比了该变形镜的面型和第10项Zernike多项式在 $y=0$ 处的截面轮廓图,其中形变量为归一化的。

为考察该变形镜拟合Zernike多项式程度,引入拟合误差系数^[24],即

$$e_R = \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^M [Z_{ij}(\rho, \theta) - W_{ij}(\rho, \theta)]^2}{\sum_{j=0}^M [Z_{ij}(\rho, \theta)]^2}}, \quad (6)$$

式中 Z_{ij} 为第 i 项Zernike像差在第 j 个采样点的形变量, W_{ij} 为镜面拟合出的第 i 项Zernike像差在第 j 个采样点的形变量, M 为有效口径内采样点的个数。图10所示为该变形镜针对前14项Zernike像差的拟合度(拟合度为 $1 - e_R$)。由图10可知,该变形镜可以较为完美地重现低阶Zernike像差。

同时考虑拟合程度和压电材料的耐压值^[25],可以进一步拟合出该变形镜不同阶Zernike像差的峰谷值,如图11所示。由图11得知,该变形镜可以获得大幅值(大于 $5 \mu\text{m}$)的低阶Zernike像差,满足一般的自适应光学系统的需要。

5 结 论

提出了一种基于新型压电材料AlN的MEMS连续面型变形镜,着重研究了其理论机电模型、驱动性能以及像差矫正性能。分别讨论了在相同

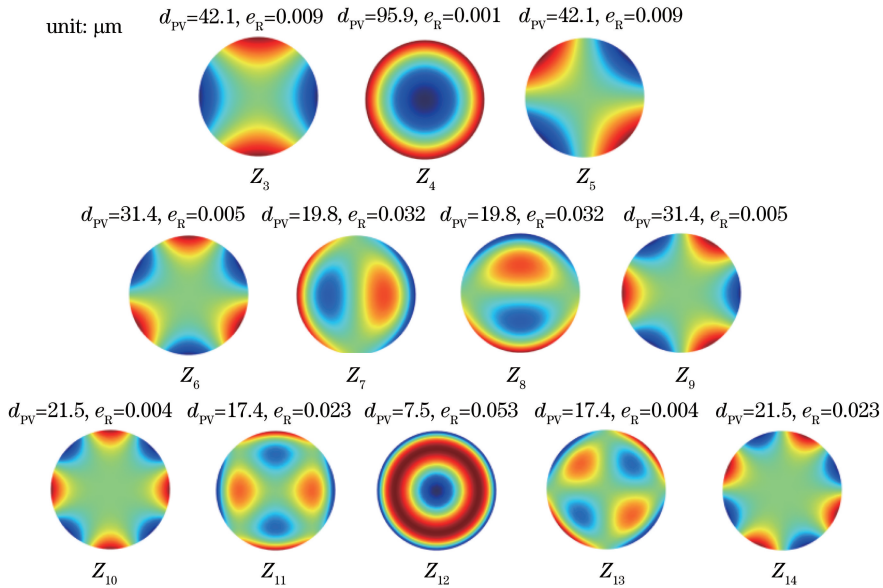


图 8 变形镜的前 14 项 Zernike 像差拟合

Fig. 8 First 14-term Zernike aberration fittings of deformable mirror

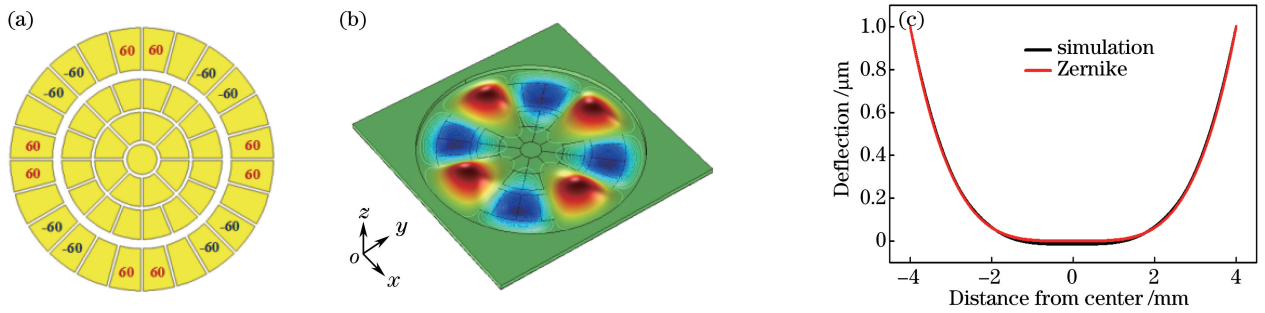


图 9 变形镜对第 10 项 Zernike 的像差矫正情况。(a)驱动电压的加载方式；(b) COMSOL 仿真结果；

(c) 仿真面型和 Zernike 像差在 $y=0$ 时的截面形变图

Fig. 9 10th-term Zernike aberration of deformable mirror. (a) Load mode of driving voltage; (b) simulation results by COMSOL; (c) cross-sectional deformation images of simulation surface and Zernike aberration at $y=0$

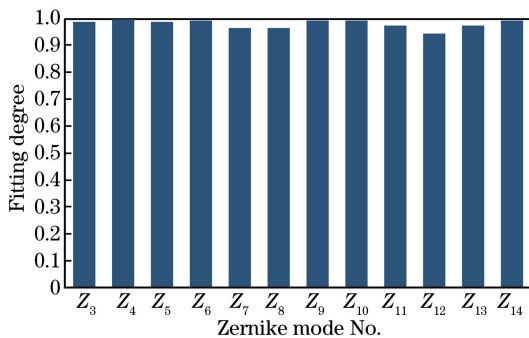


图 10 变形镜对前 14 项 Zernike 像差的拟合度
Fig. 10 Fitting degree of first 14-term Zernike aberrations of deformable mirror

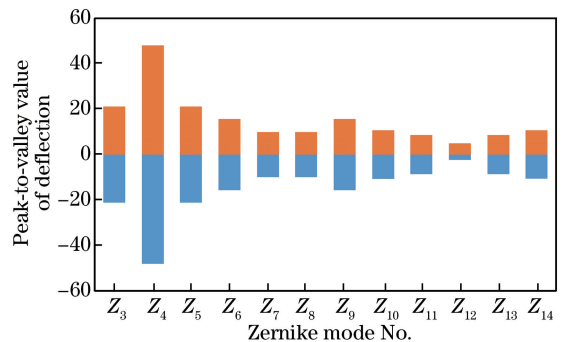


图 11 变形镜对前 14 项 Zernike 像差拟合得到的峰谷值
Fig. 11 Peak-to-valley values by fitting of first 14-term Zernike aberrations of deformable mirror

电压(或电场强度)下,变形镜的形变量随 AlN/Si 厚度的变化关系。研究表明:在相同电压下,变形镜的形变量随 Si 或 AlN 厚度的减少而单调递

减;在相同电场强度下,当 AlN/Si 的厚度之比为 0.45 时,其形变量达到最大值。结合 COMSOL 软件建立变形镜模型,分析比较涂覆 SU8 约束的方形

膜和同尺寸的圆形膜的性能,结果表明,前者可以较完美地重复后者的形变面型,验证了该变形镜具有极佳的线性驱动性能。仿真并对比了不同位置处的单个电极施加电压时镜面的变形图,结果表明,固定约束对形变的影响较大。针对变形镜的像差矫正能力,引入 Zernike 多项式进行表征,结果表明,该变形镜可以较为完美地拟合前 14 项 Zernike 像差,并且在满足耐压值和拟合度的条件下,获得了超过 $5\ \mu\text{m}$ 的形变量,满足一般自适应光学系统的要求。

参 考 文 献

- [1] Wang Z Q, Zhang P F, Qiao C H, *et al.* Simulation and analysis of general model-based wave-front sensorless adaptive optics system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0905002.
王志强, 张鹏飞, 乔春红, 等. 基于普适模型的无波前探测自适应光学系统仿真与分析[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0905002
- [2] Babcock H W. The possibility of compensating astronomical seeing [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1953, 65(386): 229-236.
- [3] Wang J Q, Luo S, Zhang B. Influence of adhesive materials on stress characteristics of deformable mirrors under thermo-mechanical coupling [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 030104.
王家秋, 罗帅, 张彬. 热-机械耦合作用下粘接材料对变形镜应力特性的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 030104.
- [4] Hofer H, Chen L, Yoon G Y, *et al.* Improvement in retinal image quality with dynamic correction of the eye's aberrations[J]. Optics Express, 2001, 8(11): 631-643.
- [5] Feng F, Wei B B, Liu W G, *et al.* Experiment study of impact of high power laser irradiation on compensation of deformable mirrors [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 0120101.
封斐, 魏斌斌, 刘文广, 等. 强激光辐照对变形镜补偿能力影响的实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 0120101.
- [6] Booth M J. Adaptive optics in microscopy [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 2007, 365(1861): 2829-2843.
- [7] Chen L X, Hu X C, Han K, *et al.* An improvement method for fitting high-frequency phase by Zernike polynomials[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0314001.
陈丽霞, 胡小川, 韩开, 等. Zernike 多项式对空间高频相位拟合的改进方法[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0314001.
- [8] Wang W M, Wang Q, Qiu C K, *et al.* Characteristics of MEMS deformable mirror based on electrostatic parallel-plate actuate[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(5): 704-707, 712.
汪为民, 王强, 邱传凯, 等. 基于静电平行板驱动器的 MEMS 变形镜特性分析[J]. 半导体光电, 2015, 36(5): 704-707, 712.
- [9] Miller M H, Perrault J A, Parker G G, *et al.* Simple models for piston-type DM behavior [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2006, 16(2): 303-313.
- [10] Perreault J A, Bifano T G, Martin L B, *et al.* Adaptive optic correction using microelectromechanical deformable mirrors [J]. Optical Engineering, 2002, 41(3): 561-566.
- [11] Zamkotsian F, Liotard A, Lanzoni P, *et al.* Electrostatic micro-deformable mirror for adaptive optics [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6272: 627222.
- [12] Wang W M, Tao F G, Wang Q, *et al.* A 19-element segmented MEMS deformable mirror based on electrostatic repulsive-force actuator[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8617: 861702.
- [13] Hishinuma Y, Yang E H. Piezoelectric unimorph microactuator arrays for single-crystal silicon continuous-membrane deformable mirror[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2006, 15(2): 370-379.
- [14] Xiao F, Dai Y, Zhao J L. High-resolution retinal imaging system with dual deformable mirrors [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0501004.
肖飞, 戴云, 赵军磊. 双变形镜人眼视网膜高分辨率显微成像系统 [J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0501004.
- [15] Ma J Q, Hu Y L, Chen J J, *et al.* Displacement improvement of piezoelectric membrane microactuator by controllable in-plane stress [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 230: 45-51.
- [16] Men H Q, Zhou L P, Xiao H N. Growth mechanism and synthesizing methods of preferential orientation of AlN thin films[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2005, 34(6): 1146-1153.
门海泉, 周灵平, 肖汉宁. AlN 薄膜择优取向生长机理及制备工艺 [J]. 人工晶体学报, 2005, 34(6):

- 1146-1153.
- [17] Sanz H A, Clement M, Iborra E, *et al.* Degradation of the piezoelectric response of sputtered *c*-axis AlN thin films with traces of non-(0002) X-ray diffraction peaks[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(16): 161915.
- [18] Mahamameed R, Sinha N, Pisani M B *et al.* Dual beam actuation of piezoelectric AlN RF MEMS switches monolithically integrated with AlN contour-mode resonators[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2008, 18: 105011.
- [19] Verpoort S, Wittrock U. Actuator patterns for unimorph and bimorph deformable mirrors [J]. Applied Optics, 2010, 49(31): 37-46.
- [20] Park H, Horsley D. Single-crystal PMN-PT MEMS deformable mirrors [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2011, 20 (6): 1473-1482.
- [21] Schneider M, Bittner A, Klein A, *et al.* Impact of film thickness and temperature on the dielectric breakdown behavior of sputtered aluminum nitride thin films [J]. Microelectronic Engineering, 2015, 140: 47-51.
- [22] Wang J Y, Silva D E. Wave-front interpretation with Zernike polynomials [J]. Applied Optics, 1980, 19(9): 1510-1518.
- [23] Aleksandrov G A, Rukosuev A L, Zavalova V Y, *et al.* Adaptive system for high power lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5120: 156-163.
- [24] Thibos L N, Applegate R A, Schwiegerling J T, *et al.* Standards for reporting the optical aberrations of eyes[J]. Journal of Refractive Surgery, 2002, 18 (5): 652-660.
- [25] Wong L L P, Na S, Chen A I, *et al.* A feasibility study of piezoelectric micromachined ultrasonic transducers fabrication using a multi-user MEMS process [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 247: 430-439.