中国光学 Chinese Optics 核心期刊

同步辐射用36单元压电变形镜研制及其面形调控研究

袁德波 许亮 张文斌 周志勇 董晓浩 刘正坤 张国斌

Development of a 36-element piezoelectric deformable mirror for synchrotron radiation and its surface control ability

YUAN De-bo, XU Liang, ZHANG Wen-bin, ZHOU Zhi-yong, DONG Xiao-hao, LIU Zheng-kun, ZHANG Guo-bin

引用本文:
袁德波, 许亮, 张文斌, 周志勇, 董晓浩, 刘正坤, 张国斌. 同步辐射用36单元压电变形镜研制及其面形调控研究[J]. 中国光学, 2021, 14(6): 1362-1367. doi: 10.37188/CO.2021-0103
YUAN De-bo, XU Liang, ZHANG Wen-bin, ZHOU Zhi-yong, DONG Xiao-hao, LIU Zheng-kun, ZHANG Guo-bin. Development of a 36-element piezoelectric deformable mirror for synchrotron radiation and its surface control ability[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1362-1367. doi: 10.37188/CO.2021-0103

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2021-0103

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双压电片镜在同步辐射光源光学系统中的应用

Application of bimorph mirror in the optical system of synchrotron radiation light source

中国光学. 2017, 10(6): 699 https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0699

采用五棱镜扫描法检测大口径平面镜的面形

Surface shape measurement of large flat mirrors using a scanning pentaprism method

中国光学. 2019, 12(4): 920 https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0920

经纬仪主镜在支撑系统下的面形变化

Surface deformation of theodolite primary mirror under the support system

中国光学. 2017, 10(4): 477 https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0477

长条形镜面面形拟合技术研究

Surface fitting technology of rectangular mirror

中国光学. 2018, 11(6): 1011 https://doi.org/10.3788/CO.20181106.1011

一种针对超大口径凸非球面的面形检测方法

Surface testing method for ultra-large convex aspheric surfaces

中国光学. 2019, 12(5): 1147 https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1147

基于红外辐射特性系统实现对面目标测量

Opposite target measurement based on infrared radiation characteristic system

中国光学. 2018, 11(5): 804 https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0804

文章编号 2095-1531(2021)06-1362-06

同步辐射用 36 单元压电变形镜研制及其面形调控研究

袁德波[1], 许 亮[2], 张文斌[3], 周志勇[3], 董晓浩[4], 刘正坤[1], 张国斌[1*]
(1. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029;
2. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
3. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 上海 200050;
4. 中国科学院 上海高等研究院, 上海 201204)

摘要: 第 4 代同步辐射光源及自由电子激光装置中束线光学系统对光学元件性能提出了苛刻的要求。使用压电变形镜是实现超高面形精度调控和实施波前补偿的有效途径, 也是目前亟需突破的国产化技术瓶颈。针对这一问题, 研制了长度为 200 mm、含 36 个单元压电促动器的压电变形镜。通过数值模拟优化了变形镜结构参数, 利用国产工艺完成了变形镜样机的制作, 并对其面形调控能力进行初步探究。测试结果表明: 所研制变形镜样机的平面面形误差可降低至 1.38 nm (rms), 斜率误差降低至 240 nrad (rms), 实现了平面面形的 nm 级调控。

关 键 词: 压电变形镜; 面形误差; 同步辐射; 自适应光学
中图分类号: TN384; O434 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2021-0103

Development of a 36-element piezoelectric deformable mirror for synchrotron radiation and its surface control ability

YUAN De-bo[1], XU Liang[2], ZHANG Wen-bin[3], ZHOU Zhi-yong[3],
DONG Xiao-hao[4], LIU Zheng-kun[1], ZHANG Guo-bin[1*]
(1. *National Synchrotron Radiation Laboratory*, *University of Science and Technology of China*, *Hefei* 230029, *China*;
2. *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics*,*Chinese Academy of Sciences*, *Xi'an* 710119,*China*;
3. *Shanghai Institute of Ceramics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai* 200050, *China*;
4. *Shanghai Advanced Research Institute*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai* 201204, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *gbzhang@ustc.edu.cn*

Abstract: Ultra-high quality optical elements are demanded by beamlimes on fourth-generation synchrotron facilities and free-electron laser facilities. A bimorph mirror is effectively used to achieve ultra-high-precision surface profile control and wavefront correction, yet it's one of the bottlenecks of domestic techniques and must be overcome. In order to accomplish this, a 200 mm long bimorph mirror with 36 elements of piezoelectric actuators was developed. The structure parameters of the bimorph mirror were optimized by nu-

收稿日期: 2021-05-10; **修订日期:** 2021-05-26
基金项目: 国家重点研发计划(No. 2016YFA0401004)
Supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFA0401004)

merical simulation, and the bimorph mirror was fabricated by domestic technology. The test results show that the surface profile error and slope error of the bimorph mirror can be reduced to 1.38 nm (rms) and 240 nrad (rms), thus the nanoscale control of the mirror surface profile was realized.

Key words: bimorph mirror; surface profile error; synchrotron radiation; adaptive optics

1　引　言

第 4 代 X 射线光源[1](X 射线自由电子激光(XFEL)、衍射极限储存环光源(DLSR)等)的出现, 对高质量 X 射线反射镜的性能提出了极高的要求。一般而言, 其面形误差要达到~1 nm(rms)量级、斜率误差低于 100 nrad(rms), 这几乎达到了现有确定性精密光学加工技术的极限。目前, 国际上仅有日本 JTEC 公司[2] 等极少数单位具备这类加工能力。除此以外, 光学元件在使用过程中还存在着装夹应力、重力、热负载等引起的无法通过精密光学加工克服的面形误差, 给第 4 代光源光束线建设带来极大的挑战。为此, X 射线变形镜技术[3-4] 应运而生。相比于传统的 X 射线反射镜, 变形镜具有两大优势[5]: 一是其面形主动调控能力, 变形镜可以通过主动调节其面形从而进一步提高面形精度, 降低光学精密加工的技术难度及成本, 对于同步辐射和自由电子激光装置常用的长条形光学元件尤为适合; 二是变形镜的动态调控能力, 可以满足第 4 代光源光束线所需的动态像差校正能力, 包括校正自身误差[6](由热负载等因素引入)、或由光束线中其他光学元件的误差引入的像差, 对于保持第 4 代光源的高亮度、高相干性是不可或缺的。

自 20 世纪 90 年代末以来, 国际上部分同步辐射装置[7-11] 开展了基于双压电片原理的 X 射线变形镜研发。总体来说, 压电变形镜技术已经得到长足进步, 实现了特定面型反射镜的纳米级面形调控[12]、快速动态调控等功能, 并且在多个同步辐射装置上得到实际应用。然而, 目前国际上同步辐射装置上采用的压电变形镜主要以装置技术研发、联合个别反射镜生产厂家共同研制的方式实现供货, 尚无标准化产品, 且价格昂贵。

国内对压电变形镜也展开了相应的研究[13-19], 但是针对同步辐射用压电变形镜, 相关的技术研究尚处于起步阶段。中国科学院高能物理研究所采用日本富士公司的锆钛酸铅(Lead zirconate titanate, PZT)压电陶瓷(尺寸为 117 mm×40 mm×7 mm), 研制了长度 120 mm、8 单元三明治结构压电变形镜[20], 在椭圆柱面上实现了 4.6 μrad(rms)的斜率误差; 中国科学院上海高等研究院采用某国产 PZT 压电陶瓷(尺寸为 100 mm×17.5 mm×2 mm), 研制了长度 100 mm、18 单元上下表面促动结构的压电变形镜[11], 实现了优于 4 nm(rms)的面形误差。受限于商品 PZT 的结构参数与性能以及压电变形镜制作工艺水平, 所研制的压电变形镜的长度、面形调控精度等受到一定制约, 无法满足第 4 代同步辐射光源的光束线上反射镜长度通常达到 200 mm 以上、面形误差~1 nm(rms)量级、斜率误差~100 nrad(rms) 量级等要求。因此, 有必要进一步开展压电变形镜技术研发。本文研究反射面长度达到 200 mm、具有 36 个压电促动单元的压电变形镜制作工艺, 实现了 nm 级平面面形精密调控。

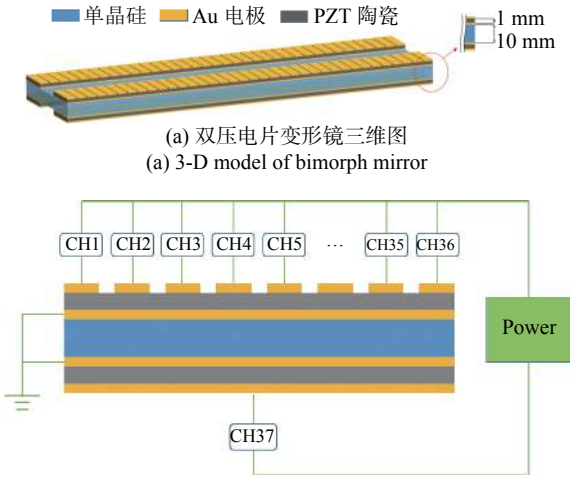
2　压电变形镜的设计与制作

2.1　压电变形镜结构设计

压电变形镜主要由促动器和反射镜两部分构成。反射镜基底材料为单晶硅, 综合考虑同步辐射光束线光学元件常规尺寸以及光学加工工艺要求, 选取反射镜尺寸为 200 mm×55 mm×10 mm。采用 PZT 压电陶瓷制作促动器, PZT 压电陶瓷元件尺寸为 200 mm×17.5 mm×d mm(d 为数值模拟参数), 共 4 块、分别粘接在反射镜的上下表面(见图 1, 彩图见期刊电子版), 其中, 上表面为反射面, 所粘接的 2 块 PZT 上制作有 36 对沿长度方向均匀分布的分立电极(即 PZT 上表面镀分立导电层, 下表面整镀), 单电极宽度为 5 mm, 下表面所粘接的 PZT 采用整体电极(上下表面均整镀)。

考虑到拼接 PZT 会在接口处造成“连接点效应”[21], 对变形镜的性能与稳定性造成影响。为了避免“连接点效应”, 必须采用整条大尺寸 PZT 元件。由于 PZT 元件的厚度与其促动能力有直接

关系，与此同时，成品 PZT 元件本身存在一定的面形扭曲，粘接到反射镜表面后将引入一定的面形误差。为了优化 PZT 厚度，采用数值模拟方法进行优化设计。仿真所使用的材料参数如表 1 所示。



(a) 双压电片变形镜三维图
(a) 3-D model of bimorph mirror

(b) 电路图
(b) Circuit image of the bimorph mirror

图 1 双压电片变形镜示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bimorph mirror

表 1 变形镜材料参数

Tab. 1 Material parameters of bimorph mirror

材料	尺寸/mm³	密度/(kg·m⁻³)	泊松比	杨氏模量/MPa
Si	200×55×10	2329	0.28	170000
PZT	200×17.5×d	7500	0.34	63000

对变形镜下表面的两个 PZT 元件整体电极施加一定的电压后，PZT 促动器使变形镜表面沿着长轴产生了拱形形变。经过数值模拟得到，在相同的单位厚度电压下（150 V/mm），最大形变量与厚度之间关系如图 2（彩图见期刊电子版）红色线条所示。由图 2 可以看到，PZT 压电陶瓷片的促动能力与厚度近似呈正比。

鉴于 PZT 元件的制作工艺限制，其表面平整性无法达到与反射镜基底相同的水平，在粘接过程中必然对反射镜面形产生影响，且这种影响同样与 PZT 厚度有关。根据变形镜的结构及实际使用情况，仅考虑 PZT 元件对反射镜长轴方向的面形影响。假设 PZT 沿长轴方向的面形起伏 $R(x)$ 为

$$R(x)=a\cos\left(\frac{2\pi x}{T}+\varphi\right), \tag{1}$$

其中，x 的取值范围为−100~100 mm，a 表示振幅，T 表示周期，为 200 mm，φ表示相移。经过数值模拟计算，当φ=0 时，对面形的影响最大，所以在后续仿真中仅考虑φ=0 的情况。根据实测数据，长 200 mm 的 PZT 元件面形起伏为百微米量级，取 a=100 μm。在不同厚度 d 情况下，计算获得反射镜基底形变的 PV 值，结果如图 2 中黑色线条所示。增加 PZT 元件厚度将提高其主动调节能力，但同时也会放大 PZT 表面的不平整性对反射镜的影响。为了确保变形镜的调节能力，PZT 元件的主动调节能力上限应大于 PZT 元件本身不平整性带来的影响。根据仿真结果，PZT元件厚度应小于 1.2 mm，结合制作工艺方面的考虑，选取 PZT 厚度为 1 mm。

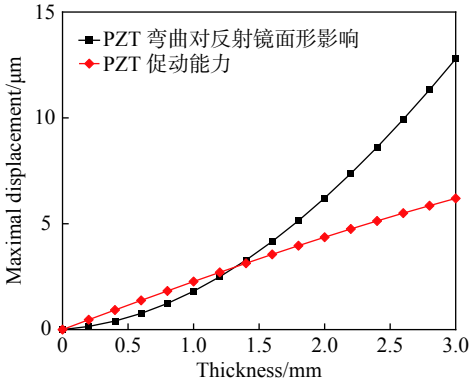


图 2 PZT 促动能力（红）、PZT 表面弯曲对反射镜面形造成的影响（黑）与 PZT 厚度关系

Fig. 2 Relationship between the thickness of PZT and the actuation capacity of PZT (red) as well as that between the thickness of PZT and the influence of PZT's bend on mirror surface (black)

2.2 压电变形镜制作

平面反射镜基底采用国内常规光学加工方法制作，斜率误差约为 1 μrad。PZT 压电陶瓷由中国科学院上海硅酸盐研究所研制。基于固相反应法，通过优化的等静压成型、通氧烧结和高温极化等关键工艺，制备出了大尺寸、高致密、高压电性能的 PZT 压电陶瓷元件（尺寸为 200 mm×17.5 mm×1 mm）。压电陶瓷图形电极制作工艺采用精密线切割技术制作掩模，然后通过离子束溅射工艺制备图案化电极。其中两块压电陶瓷上表面制作分立电极，每个电极宽度为 5 mm，电极间隔约为

0.57 mm, 下表面为整体电极, 形成 36 个独立电极, 驱动反射镜产生局部变形。底部两块压电陶瓷上下表面均镀整体电极, 用于产生整体变形, 获得特定的曲率半径。这种对称结构可以有效地减小热变形引起的不稳定性[22]。

用环氧树脂作为结构胶, 设计专用工装夹具保证涂胶均匀、并在压电陶瓷片与反射镜基底之间产生一定的压力, 然后在特定温度条件下固化, 将压电陶瓷和反射镜牢固胶合。导电银浆将 0.2 mm 铜丝粘合到电极上, 在 80 ℃ 恒温箱中固化 2 h, 制作成引出电极。利用弹性装卡机构将制作好的压电变形镜安装定位, 支架采用硬铝结构。反射镜背面采用弹性支撑, 降低镜架产生的阻力。制作完成的压电变形镜如图 3 所示。

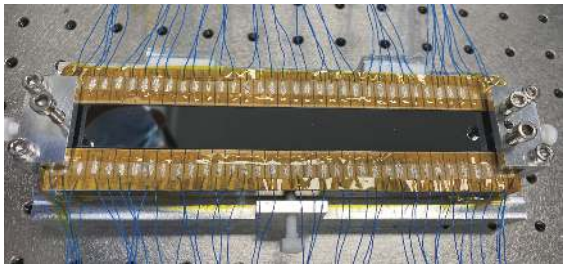


图 3　装配后的压电片变形镜

Fig. 3　Assembled bimorph mirror

3　压电变形镜性能表征

3.1　电极响应函数

压电变形镜的总体形变来自于电压作用下各电极引起的变形量的线性叠加, 精确测量各电极的响应函数是确保压电变形镜正常工作的前提。实验中采用的多通道压电驱动电源含有 85 个独立驱动电压通道, 单路电压范围为±180 V, 精度为 ±0.1 V, 电压纹波小于 1‰, 并且可以编程独立控制每一路电压输出, 基本满足实验要求。采用干涉仪(型号 Dynafiz 12")记录单个电极加电压时的面形变化, 取反射镜长轴方向中心线的面形高度分布、得到单电极响应曲线。实验发现, 电压改变后 2 min 变形镜形变趋于稳定, 故每次电压改变 3 min 后开始测量。每次测量结果均是间隔 20 s 测量的 5 组数据取平均, 所得到的面形高度 rms 变化范围为±0.2 nm。具体测量时, 首先将 100 V 电压施加到任意一个分立电极, 测量反射镜面形高度分布, 测量结束后将电压归零, 再次测量反射镜面形高度分布, 取两次测量的差值即可得到该电极的电压响应曲线。重复步骤直至得到所有电极的响应曲线, 如图 4(彩图见期刊电子版)所示(考虑到镜架的遮挡, 图中未画出边缘 4 对电极的响应曲线)。

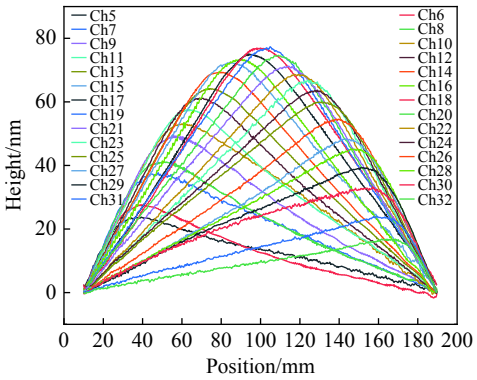


图 4　100 V 电压下的响应曲线

Fig. 4　Response curve under 100 V voltage

3.2　面形调控

经过对 36 组电极的电压-形变进行测量, 得到电压的相应矩阵 $\boldsymbol{H}_{36\times n}$, n 为沿反射镜长轴方向干涉仪测量的取样点数。设目标面形为 $\boldsymbol{A}_{1\times n}$, 初始面形矩阵为 $\boldsymbol{G}_{1\times n}$, 所需施加电压矩阵为 $\boldsymbol{V}_{1\times 36}$, 则有:

$$\boldsymbol{VH}=\boldsymbol{A}-\boldsymbol{G}\quad , \tag{2}$$

$$\boldsymbol{V}=(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{G})\boldsymbol{H}^{-1}\quad . \tag{3}$$

采用最小二乘法求逆矩阵的方法, 获得电压控制矩阵。将校正电压施加到对应电极, 得到校正后的面形, 如图 5(彩图见期刊电子版)所示。

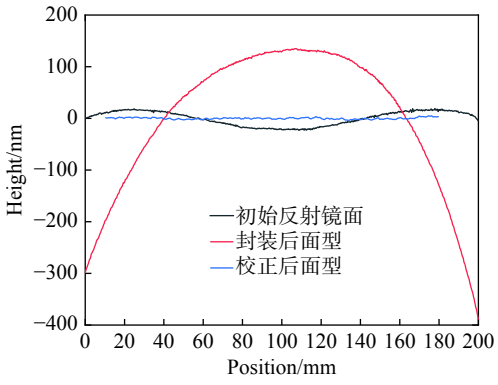


图 5　反射镜封装与校正前后面形

Fig. 5　Mirror surfaces at different stages

经测量, 在粘接 PZT 元件前, 反射镜表面高度 PV 值为 42.08 nm, rms 值为 13.72 nm; 粘接 PZT

元件并装夹到镜架后，表面高度 PV 值升高至 524.55 nm，rms 值为 135.54 nm，表明变形镜在封装过程中表面性能会受到较大影响。经过封装后，反射镜的表面呈现明显的拱形凸起。造成这种变形的原因主要是 PZT 元件表面的不平整性和变形镜特殊的支撑结构。经过压电校正后，反射镜面形得到了很大的改善，表面高度 PV 值降到了 3.75 nm，rms 值降到了 1.38 nm，相比较于校正前，精度提高了两个数量级，甚至优于单晶硅基底的初始面形 (rms 13.72 nm)，基本实现了纳米级面形调控。为了进一步验证系统的可靠性，间隔 24 h 对变形镜施加相同的校正电压，观察系统的面形质量，得到如表 2 所示的结果。

表 2　变形镜重复性

Tab. 2　Repeatability of bimorph mirror

时间/天	0	1	2	3	4
PV/nm	3.75	3.92	3.44	4.03	3.68
rms/nm	1.38	1.53	1.21	1.65	1.51

结果表明，5 天测量中，压电变形镜的面形数据为(1.46±0.25) nm，重复性较好。面形数据测量的取样间隔为 0.276 mm，对其进行一次微分处理，可以得到反射镜表面斜率误差。由于干涉仪测量结果中存在大量高频噪点，当目标曲面为平面时，这些噪点已经不可忽略，所以计算斜率误差时对测量结果进行了高频滤波处理。采用 Savitzky-Golay 滤波，取窗口点数为 20 时可以有效滤除数据中的高频噪点，计算得到的反射镜斜率误差见图 6。压电校正后反射镜斜率误差为 0.24 μrad(rms)。

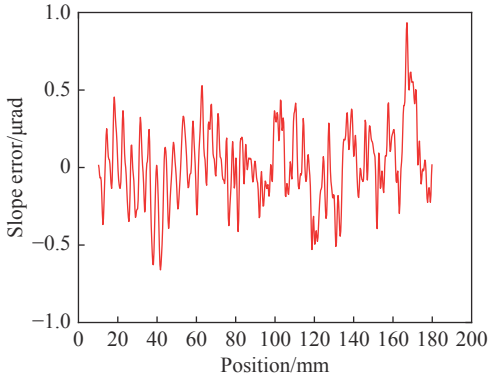


图 6　斜率误差曲线

Fig. 6　Slope error curve

4　结　论

结合数值模拟优化，利用国内工艺条件，设计、制作了 36 电极的压电变形镜，其反射面长度达到 200 mm(有效反射面长度 180 mm)，表面高度误差降到 1.38 nm(rms)，斜率误差为 0.24 μrad(rms)，实现了平面面形的纳米级调控，表明了压电变形镜技术国产化的可行性。

参考文献：

[1] 李晓东, 袁清习, 徐伟, 等. 第四代高能同步辐射光源HEPS及高压相关线站建设[J]. 高压物理学报, 2020, 34(5): 050101.
LI X D, YUAN Q X, XU W, *et al*.. Introduction of fourth-generation high energy photon source HEPS and the beamlines for high-pressure research[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2020, 34(5): 050101. (in Chinese)

[2] MATSUYAMA S, NAKAMORI H, GOTO T, *et al*.. Nearly diffraction-limited X-ray focusing with variable-numerical-aperture focusing optical system based on four deformable mirrors[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 24801.

[3] COCCO D, BORTOLETTO G, SERGO R, *et al*.. A hybrid active optical system for wave front preservation and variable focal distance[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*: *Accelerators*, *Spectrometers*, *Detectors and Associated Equipment*, 2010, 616(2/3): 128-133.

[4] IDIR M, MERCERE P, MODI M H, *et al*.. X-ray active mirror coupled with a Hartmann wavefront sensor[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*: *Accelerators*, *Spectrometers*, *Detectors and Associated Equipment*, 2010, 616(2/3): 162-171.

[5] ALCOCK S G, SUTTER J P, SAWHNEY K J S, *et al*.. Bimorph mirrors: the good, the bad, and the ugly[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*: *Accelerators*, *Spectrometers*, *Detectors and Associated Equipment*, 2013, 710: 87-92.

[6] JUNG H, GWEON D G. Creep characteristics of piezoelectric actuators[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(4): 1896-1900.

[7] SUTTER J P, CHATER P A, SIGNORATO R, *et al*.. 1 m long multilayer-coated deformable piezoelectric bimorph mirror for adjustable focusing of high-energy X-rays[J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 16121-16142.

[8] ALCOCK S G, NISTEA I T, SIGNORATO R, *et al*.. Dynamic adaptive X-ray optics. Part I. Time-resolved optical metrology investigation of the bending behaviour of piezoelectric bimorph deformable X-ray mirrors[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2019, 26(Pt 1): 36-44.

[9] ALCOCK S G, NISTEA I T, SIGNORATO R, *et al*.. Dynamic adaptive X-ray optics. Part II. High-speed piezoelectric bimorph deformable Kirkpatrick-Baez mirrors for rapid variation of the 2D size and shape of X-ray beams[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2019, 26(Pt 1): 45-51.

[10] ALCOCK S G, NISTEA I T, BADAMI V G, *et al*.. High-speed adaptive optics using bimorph deformable X-ray mirrors[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(2): 021712.

[11] JIANG H, TIAN N X, LIANG D X, *et al*.. A piezoelectric deformable X-ray mirror for phase compensation based on global optimization[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2019, 26(Pt 3): 729-736.

[12] ALCOCK S G, NISTEA I, SAWHNEY K. Nano-metrology: the art of measuring X-ray mirrors with slope errors < 100 nrad[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(5): 051902.

[13] 王建立, 董玉磊, 姚凯男, 等. 349单元自适应光学波前处理器[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(5): 1007-1013.
WANG J L, DONG Y L, YAO K N, *et al*.. Three hundred and fourty-nine unit adaptive optical wavefront processor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(5): 1007-1013. (in Chinese)

[14] 马剑强, 刘莹, 陈俊杰, 等. 200单元硅基单压电变形镜的设计与测试[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(8): 2047-2053.
MA J Q, LIU Y, CHEN J J, *et al*.. Design and performance testing of 200-element silicon unimorph deformable mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2047-2053. (in Chinese)

[15] 林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 137单元变形镜的性能测试及校正能力实验[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(2): 267-273.
LIN X D, LIU X Y, WANG J L, *et al*.. Performance test and experiment of correction capability of 137-element deformable mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 267-273. (in Chinese)

[16] 金利民, 罗红心, 王劼, 等. 双压电片镜在同步辐射光源光学系统中的应用[J]. 中国光学, 2017, 10(6): 699-707.
JIN L M, LUO H X, WANG J, *et al*.. Application of bimorph mirror in the optical system of synchrotron radiation light source[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(6): 699-707. (in Chinese)

[17] 彭泰然, 李文来, 娄军强, 等. 正电压边缘驱动的双压电片变形镜研制[J]. 光子学报, 2019, 48(8): 0822003.
PENG T R, LI W L, LOU J Q, *et al*.. Development of a bimorph deformable mirror driven by positive-voltage actuators at edge[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(8): 0822003. (in Chinese)

[18] NING Y, JIANG W H, LING N, *et al*.. Response function calculation and sensitivity comparison analysis of various bimorph deformable mirrors[J]. *Optics Express*, 2007, 15(19): 12030-12038.

[19] 姜文汉. 自适应光学发展综述[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 170489.
JIANG W H. Overview of adaptive optics development[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170489. (in Chinese)

[20] 张瑶, 汤善治, 李明, 等. 同步辐射中双压电片反射镜的研究现状[J]. 物理学报, 2016, 65(1): 010702.
ZHANG Y, TANG SH ZH, LI M, *et al*.. Present research status of piezoelectric bimorph mirrors in synchrotron radiation sources[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(1): 010702. (in Chinese)

[21] ALCOCK S G, NISTEA I, SUTTER J P, *et al*.. Characterization of a next-generation piezo bimorph X-ray mirror for synchrotron beamlines[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2015, 22(1): 10-15.

[22] ICHII Y, OKADA H, NAKAMORI H, *et al*.. Development of a glue-free bimorph mirror for use in vacuum chambers[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(2): 021702.

作者简介：

袁德波(1996—)，男，安徽六安人，中国科学技术大学国家同步辐射实验室硕士研究生，2019 年于南京理工大学获得学士学位，主要从事压电变形镜方面的研究。E-mail: yuandebo@mail.ustc.edu.cn

张国斌(1967—)，男，江苏常熟人，博士，研究员，博士生导师，1990 年、2001 年于中国科学技术大学分别获得学士、博士学位，主要从事氧化物量子功能材料制备与物性、同步辐射光学工程、X 射线自适应光学的研究。E-mail: gbzhang@ustc.edu.cn