

用于同步辐射的硬 X 射线相位补偿镜的研究

田纳玺^{1,2,3}, 蒋晖^{1,3*}, 李爱国^{1,3**}, 梁东旭^{1,3}, 闫帅^{1,3}

¹中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³中国科学院上海高等研究院上海同步辐射光源先进成像与工业应用研究部, 上海 201204

摘要 设计和加工了一台相位补偿的压电变形镜, 使用干涉仪离线表征了其压电变形性能, 并提出迭代全局优化算法, 实现了变形镜对目标面形的快速高精度逼近。结合 X 射线散斑扫描技术, 在光束的聚焦模式下测试了变形镜的在线相位补偿性能和对聚焦光斑尺寸的优化能力, 结果显示, 初始的 43.4 μm 焦斑尺寸经相位补偿后被压缩到了 12.9 μm 。上述研究为上海同步辐射光源的快速相位补偿提供了可能。

关键词 X 射线光学; X 射线变形镜; 相位补偿; X 射线散斑扫描技术; 硬 X 射线聚焦; 同步辐射

中图分类号 O434.19

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0934001

Study on Phase Compensation Mirror Used for Hard X-Ray Synchrotron Radiation

Tian Naxi^{1,2,3}, Jiang Hui^{1,3*}, Li Aiguo^{1,3**}, Liang Dongxu^{1,3}, Yan Shuai^{1,3}

¹Shanghai Institute of Apply Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Department of Advanced Imaging and Industrial Application Research, Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China

Abstract A piezoelectric deformable mirror for phase compensation is designed and fabricated and its piezoelectric properties are *ex situ* characterized by using the Fizeau interferometer. Moreover, an iterative global optimization algorithm is developed to realize a quick and accurate approach to the target figure. The *in situ* phase compensation performance of the mirror and its ability to optimize the focusing spot size are verified under the focusing beam mode and with the hard X-ray speckle scanning metrology. The experimental results show that the focal spot size is compressed from 43.4 μm to 12.9 μm after phase compensation. The research here lays a foundation for the realization of rapid phase compensation in the Shanghai Synchrotron Radiation Facility.

Key words X-ray optics; X-ray deformable mirror; phase compensation; X-ray speckle scanning metrology; hard X-ray focusing; synchrotron radiation

OCIS codes 340.7470; 340.7480; 340.6720

1 引 言

第三代同步辐射光源具有高亮度、高相干和宽频谱等优良特性, 极大地促进了材料科学、生命科学、环境能源等科学研究领域的发展^[1-4]。微纳尺度下物质展现出不同于宏观物体的全新性质, 基于同步辐射的 X 射线微纳探针获得了广泛的关注^[5]。相比传统的电子显微技术, X 射线无损、高穿透、大焦深等优势令其在样品多尺度快速表征, 原位实验

和多实验方法集成等方面展现了巨大的潜力。

目前常见的 X 射线亚纳米聚焦技术包括 Kirkpatrick-Baez (K-B) 聚焦镜^[6]、菲涅耳波带片^[7]、多层膜劳厄透镜^[8]、复合折射率透镜^[9]等。由于纳米量级聚焦技术受到衍射极限的制约, 最小极限聚焦光斑会受限于瑞利判据。受元件加工极限的制约, 单纳米尺度聚焦的发展处于瓶颈。多层膜劳厄透镜可以在小于 2 mm 的工作距离下获得尺寸为 10 nm 左右的二维聚焦光斑^[10-11], 但该元件存在聚

收稿日期: 2019-12-16; 修回日期: 2020-01-14; 录用日期: 2020-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(11775295)、中国科学院青年促进会项目(2018295)

* E-mail: jianghui@sinap.ac.cn; ** E-mail: liaiguo@sinap.ac.cn

焦效率低且工作距离短的不足。在大数值孔径的多层膜 K-B 聚焦系统下,通过增加相位补偿系统,日本大阪大学课题组使用迭代反演的波前误差测量方法,结合变形镜压电促动器分立调整优化的相位补偿方案,在 SPring-8 光源的超长线上测试得到了小于 10 nm 的聚焦光斑^[12]。但是该技术缺乏长时间稳定的测量数据,目前尚未有实际应用。

上海光源二期工程硬 X 射线纳米探针线站将采用 K-B 聚焦结合相位补偿系统的方案,以在较大的工作距离下获得约 10 nm 的聚焦光斑^[13]。该方案的核心就是相位补偿技术。若单独使用多层膜 K-B 聚焦镜实现纳米聚焦,根据瑞利判据,其镜面的峰谷(PV)面形误差要优于 1 nm,但目前镜面抛光技术难以实现^[14]。增加的压电变形镜工作在全反射角范围内,根据光程关系,其面形抛光要求远低于 K-B 镜。影响 K-B 镜聚焦性能的主要是中低频率的面形误差,因此相位补偿镜仅需要少量的压电片就可以满足相位补偿的要求^[13]。

相位补偿的核心元件——相位补偿镜是一种利用不同输出电压来改变镜面面形的压电变形镜,其电致变形原理是基于压电陶瓷的电场作用的伸缩性质^[15]。当每个电极上的驱动电压的电极方向平行于每块压电材料的极化方向时,压电材料横向的伸缩将带动光学基底的背面伸缩,从而改变镜面面形,使其达到预设曲率。这种自适应光学元件常用于天文和气象观测^[16],近年来在同步辐射领域也得到了成功应用^[17]。相对于天文观测领域对变形镜的大口径要求,X 射线相位补偿镜的应用难点在于镜面面形的精确加工和亚纳米

量级的压电面形控制。

基于上海光源线站工程中纳米探针线站对相位补偿系统的需求,本文自主设计并委托加工了一台相位补偿镜样机,利用干涉仪研究了相位补偿镜的变形性能,提出了一种基于全局优化的高精度相位补偿镜面形调控方法,并结合散斑扫描在线测量方法,在上海光源硬 X 射线微聚焦线站对相位补偿镜进行了在线波前恢复实验。测试结果验证了基于相位补偿系统的硬 X 射线聚焦优化的可行性,有助于硬 X 射线纳米聚焦的实现。

2 相位补偿镜的设计加工

根据目前上海光源微聚焦线站的实验条件,设计和加工了一台相位补偿镜样机,该变形镜原理和样机如图 1 所示,其基底和反射层是尺寸为 100 mm×50 mm×7 mm 的硅晶片,其中心线附近的均方根(RMS)表面粗糙度为(0.45±0.01) nm。使用导电胶在硅晶片的表面和底面各粘贴两条 100 mm×17.5 mm×2 mm 的钛酸锆铅(PZT51)压电陶瓷片。电极方向与极化方向垂直时压电常数为 $D_{31} = 170 \text{ pC} \cdot \text{N}^{-1}$,平行时压电常数为 $D_{33} = 400 \text{ pC} \cdot \text{N}^{-1}$ 。在压电片上沉积镍层并将其作为独立的促动器。补偿镜底面的每个促动器的尺寸是 48 mm×17.5 mm,间隔是 0.8 mm。两侧对称的 18 对促动器由 18 路独立的范围为-500~500 V 的电压驱动,电压稳定性优于 0.1%。补偿镜表面的促动器和压电片有着相同的尺寸,由第 19 路电压驱动,用于镜体产生整体的压弯变形。整个镜面两端使用软性材料固定在刚性基座上。

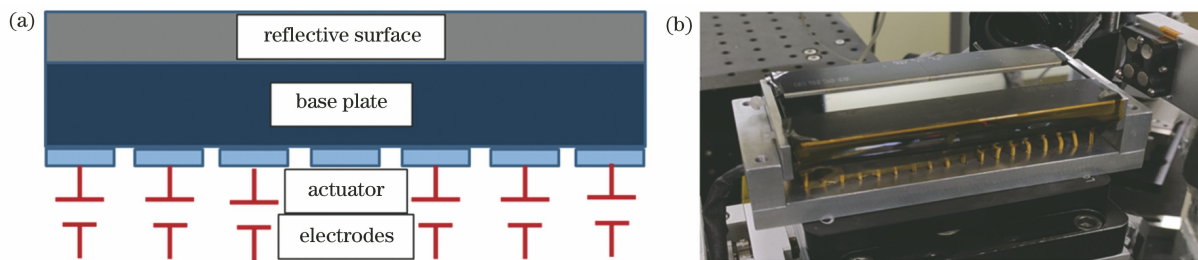


图 1 相位补偿镜示意图。(a)变形镜原理;(b)相位补偿镜样机

Fig. 1 Photograph of phase compensation mirror. (a) Principle of deformable mirror; (b) prototype phase compensation mirror

3 离线相位补偿镜性能表征

3.1 相位补偿镜压电性能模拟和测试

为了研究该相位补偿镜的变形性能,首先使用 ANSYS 软件建立变形镜的有限元模型。根据镜子

的结构,有限元分析是基于 18 个促动器进行的。图 2 展示了第 2 路和第 6 路促动器在输入+500 V 电压后的镜面面形。

为了测试相位补偿镜的实际面形变化和电压之间的关系,通过大口径干涉仪对镜子进行了面形检

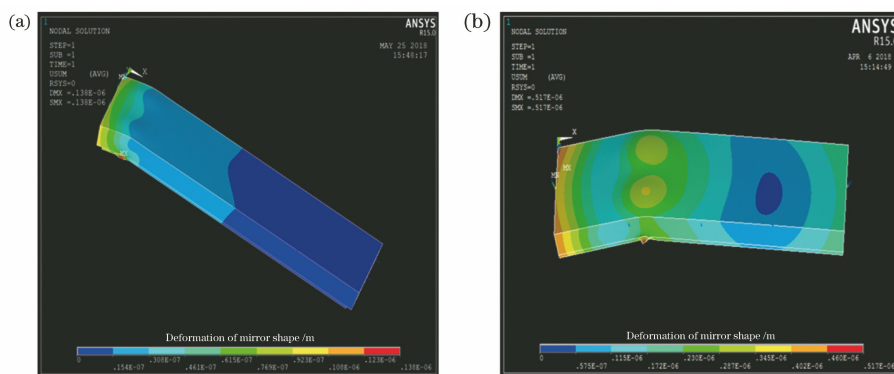


图2 驱动电压为+500 V时补偿镜的ANSYS面形模拟结果。(a)第2路;(b)第6路

Fig. 2 Surface shape results of compensation mirror with a driving voltage of +500 V simulated by ANSYS.

(a) Second actuator; (b) sixth actuator

测。采用5次测量的平均值作为单次测量的结果,以保证结果的可信度。测量时给18路促动器逐个输入电压,每当有新的促动器接收到输入电压后,测量镜子的面形,比较电压输入前后镜子面形的差值^[18],通过二次求导可以计算出该促动器的压电响应函数(PRF),此函数定义为1 V电压下此促动器产生的面形曲率变化。实际测量得到的压电响应函数与其模拟结果的对比如图3(a)所示。在图3(b)中可以观察到加电压后每个促动器实测与模拟的压电响应函数的中心位置 X_c 及其相应的半峰全宽(FWHM)。结果表明,测量响应函数的幅度略小于

模拟结果。除了两端外,测量的压电响应函数的中心位置与模拟值基本一致。接近两端处的压电响应函数具有较小的振幅,这将影响相位补偿镜对接近两端的光束的补偿能力。此外,与模拟的压电响应函数相比,实测结果具有更宽的响应范围,促动器的压电响应函数可影响大约4个相邻的促动器,意味着促动器之间存在较强的耦合。相位补偿镜的一个重要的评价指标是其稳定性,实测得到相位补偿镜有很好的短时稳定性(2 min内面形变化 $<0.5\%$)和重复性(面形变化 $<0.5\%$),4.5 h内的均方根稳定性优于每小时1.5%。

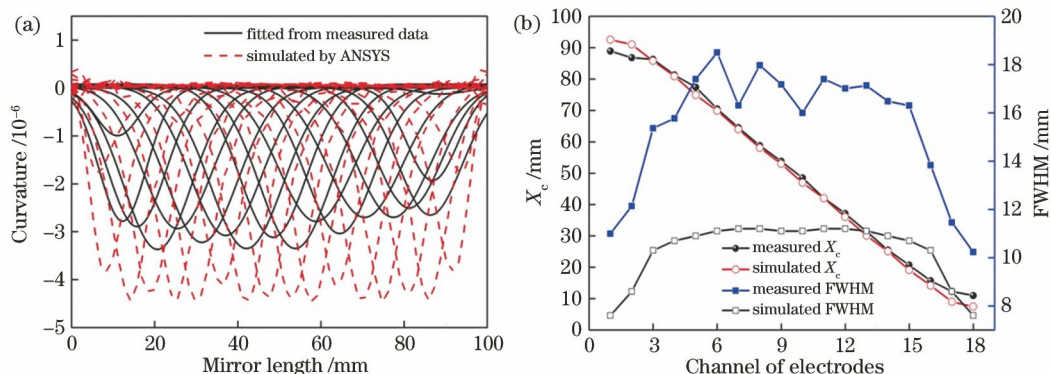


图3 相位补偿镜的模拟与实测结果对比。(a)压电响应函数;(b)压电响应函数的中心位置和半峰全宽

Fig. 3 Comparison between simulation and measurement results of phase compensation mirror.

(a) PRF; (b) center positions and FWHMs of PRFs

3.2 相位补偿镜的面形调控方案

对于掠入射反射元件,由于斜率误差 s 远小于1,因此曲率误差 C 近似等于斜率误差的一阶导数和面形误差 Δh 的二阶导数。而相位误差 $\Delta\varphi$ 与面形误差的关系为 $\Delta\varphi = 2k\Delta h \sin\theta$,其中, k 是波数, θ 是掠入射角。在相位补偿的过程中,基于测试手段和测量对象(面形、斜率或者曲率)的不同,相位补偿镜的补偿对象可以是面形误差、斜率误差或者曲率

误差。

有研究者提出了基于窗口傅里叶和加权多项式拟合的面形控制方案^[19],但是对于小尺度的变形镜,压电响应函数有显著的重叠效应,直接使用窗函数计算每个促动器所产生的面形变化会存在误差,且会减慢拟合的收敛速度。为了逼近真实的镜面面形,提出了一种更适用于小尺度相位补偿镜的面形调控的迭代全局优化算法^[20]。

先用 K_i 标记第 i 个促动器和压电片,测量得到压电响应系数是 $K'_i = K_i + \Delta K_i$,其中, ΔK_i 是第 i 个压电片的实测误差。第 i 个促动器上的目标镜面的切向曲率为 C_i^0 ,初始的输入电压 $U_i^0 = C_i^0 / K'_i$ 。可测得第 i 个促动器上的切向曲率为 $C_i^1 = K_i U_i^0 = (1 - \Delta K_i / K'_i) C_i^0$ 。根据输入电压和面形曲率的关系 $\Delta U = \Delta C / K'$ (ΔU 为电压变化量, ΔC 为相应的曲率变化量, K' 为压电响应系数),输入新电压就可以得到新的曲率。重复该递推过程,当输入第 j 次迭代电压时,测量得到的切向曲率和相应的输入电

压^[20]分别为

$$C_i^j = [1 - (\Delta K_i / K'_i)^{j-1}] C_i^0, \quad (1)$$

$$U_i^j = \frac{U_i^0 [1 - (\Delta K_i / K'_i)^{j+1}]}{1 - (\Delta K_i / K'_i)}. \quad (2)$$

根据(1)式可知,镜子的曲率会以指数形式迅速逼近目标值。通过精确测量压电响应系数可以减少迭代次数。基于该迭代过程,通过优化测量对象(曲率、斜率或面形)与目标值的偏差(评价函数),即可得到最佳的电压组合。完整的面形调控流程如图 4 所示。

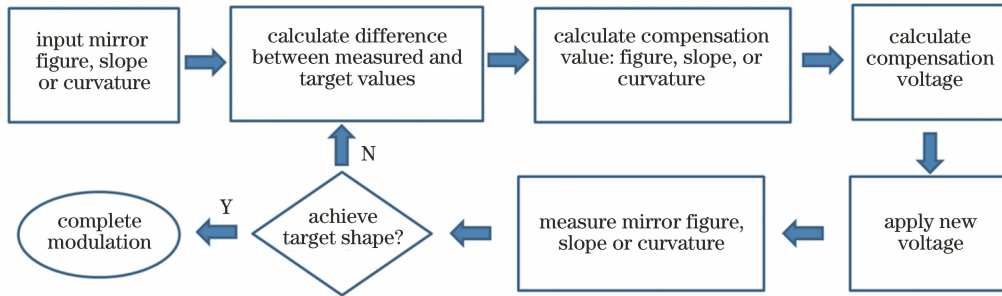


图 4 相位补偿镜的面形调控流程图

Fig. 4 Modulation flow chart of phase compensation mirror

为了验证面形调控算法,首先设计了一个峰谷面形为 350 nm 的目标面形,通过干涉仪进行离线面形调控测试。利用上述迭代全局优化算法,对镜面进行了多次调控,使其贴合目标面形。如图 5 所示,首次输入的电压是根据离线测得的压电响应函数计算而来的。由于压电响应系数的测量误差,首次电压输入后的实测面形与目标面形存在较大偏差。在随后的迭代中,通过减小优化程序中电压的取值范围,避免了促动器的电压组合出现较大波动,并使评价函数快速收敛,进而获得最优电压组合。经过 14 次迭代后,相位补偿镜的面形基本贴合目标面形,其均方根面形误差由首次迭代的 44 nm 减少到 7 nm,其中镜面中心区域均方根面形误差优于 4 nm,甚至远优于镜面本身的面形误差。

4 在线相位补偿测试

同步辐射常见的在线波前测量方法包括细光束法^[21],光栅测量法^[22]和散斑测量法^[23]等。其中,细光束法虽然测量原理简单,但是分辨率受到了探测器和实验条件的限制。光栅测量法具有测量精度高的优点,但是其实验装置比较复杂且光栅成本高。相比之下,散斑测量法实验结构简单,精度很高,在基于 X 射线散斑和激光散斑的波前表征中已经取得广泛应用^[23-26]。

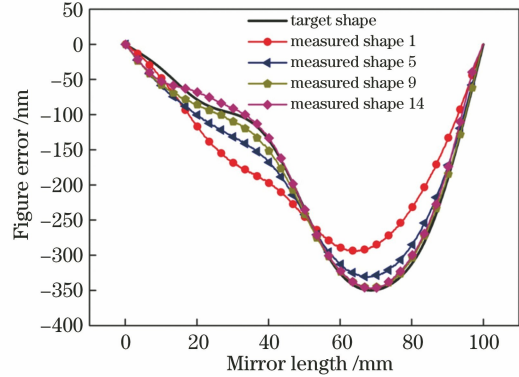


图 5 相位补偿镜的实测面形与目标面形对比

Fig. 5 Comparison between measured shape error and target mirror shape of phase compensation mirror

经过散射体的散射光与透射光干涉叠加产生 X 射线近场散斑^[27],不同位置的散斑记录了相应位置光束的波前畸变信息,因此可将其作为波前强度调制器以测量波前误差^[23]。通过扫描散射体如砂纸,可获得一系列等间距的散斑图,其中间距与砂纸移动步长相等。提取每张散斑图中的第 m 行和第 n 行并组成两张新的散斑图。散射体标记的波前的局部畸变引起了散斑位移,利用数字图像相关算法(DIC)计算出该散斑位移。基于散斑扫描法的测量方案如图 6 所示,其测量的局部波前曲率半径 R ^[25]可以被表示为

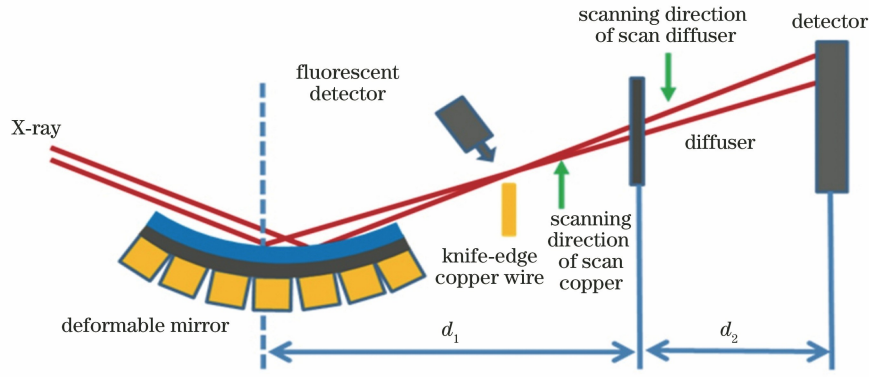


图 6 相位补偿镜的在线相位补偿测量原理图

Fig. 6 Principle of *in situ* phase compensation measurement for phase compensation mirror

$$R = \frac{(n - m)pd_2}{(n - m)p - \mu_{mn}\Delta t}, \quad (3)$$

式中： d_2 为砂纸散射体到探测器的距离； p 是单像素尺寸； μ_{mn} 是 DIC 计算的偏移量； Δt 是砂纸扫描步长。

为了简化实验，相位补偿镜样机结合了相位补偿镜和聚焦镜的功能，镜体背面的 18 路电压控制镜面以实现小的面形补偿，而正面的第 19 路电压控制镜体产生整体的压弯变形以达到聚焦效果。变形镜的在线相位补偿测量原理如图 6 所示。

实验装置的照片如图 7 所示。在实验过程中，到达变形镜前的入射光是垂直方向宽度为 $380 \mu\text{m}$ 的准直光，能量为 10 keV 。镜子安装在有投角转台的样品台上，掠入射角为 $(0.128 \pm 0.002)^\circ$ 。先前工作已研究散射体颗粒、探测器像素、噪声和相干性等因素对散斑测量法精度的影响^[28]，发现接近探测器像素尺寸的散射体颗粒有更好的计算精度。因此，选择平均颗粒尺寸为 $1 \mu\text{m}$ 的砂纸，将其安装在镜子后方距离为 $d_1 = 0.807 \text{ m}$ 的位置，其与变形镜焦点的距离为 0.092 m 。使用高精度的 Kohzu 电机，以 $0.4 \mu\text{m}$ 固定步长沿着垂直方向扫描砂纸，每次扫描的采图数量为 50 张。高分辨探测器安装在整个测试系统的末端，它由可变焦光学转换器和 CMOS 探测器组成，其与砂纸的间距为 $d_2 = 0.678 \text{ m}$ 。探测器的单像素有效尺寸为 $p = 0.65 \mu\text{m}$ （10 倍镜头）。实验中每步扫描中的曝光时间是 100 ms ，扫描间隔为 1.5 s 。结合文献^[25]中的计算方法，此实验条件下散斑扫描测量的斜率误差灵敏度约为 30 nrad 。本次实验中采集到的散斑图的信噪比是 19.1 dB ，不会引起小颗粒砂纸的显著测量误差^[28]。为了检测聚焦镜实际焦斑尺寸的变化，验证相位补偿的聚焦优化效果，在焦点处安装有直径为 $200 \mu\text{m}$ 的铜丝并将其作为刀口，通过扫描过程中铜的荧光

信号变化来检测光斑的尺寸。实验中荧光信号由 Vortex 硅漂移探测器采集。

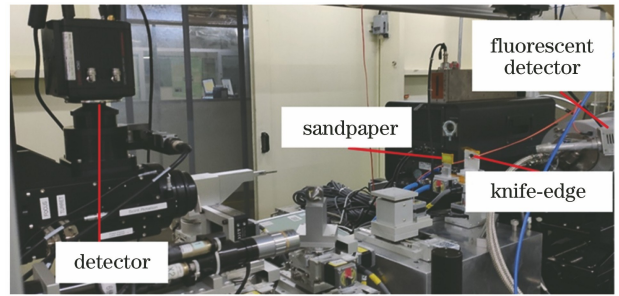


图 7 相位补偿系统的测试布局图

Fig. 7 Layout of phase compensation testing system

对于聚焦镜，波前相位误差补偿的最终目的是使探测面的波前曲率为常数，可利用焦斑尺寸的变化进行直接验证。相位补偿镜表面的第 19 路促动器的初始电压为 440 V ，相位补偿镜处于聚焦状态，刀口扫描显示初始焦斑尺寸为 $43.4 \mu\text{m}$ 。通过测量的波前曲率半径和实验实际的几何关系，将第 19 路促动器电压优化为 380 V ，并调节背面的 18 路促动器电压以优化波前曲率。如图 8(a) 所示，通过四次迭代优化后，相位补偿的镜面波前曲率误差曲线显著趋于平整，镜面中心区域的均方根曲率误差减小到 6.6×10^{-5} 。图 8(b) 显示了相位补偿过程中每次迭代的 18 路电压的变化。每次迭代后，利用刀口在同样位置进行扫描，获得的焦斑形状如图 9 所示，该结果是刀口扫描原始数据求微分之后的结果，因此一些噪声信号被放大，但是并不影响本身焦斑形态和尺寸的判断。此外，刀口的面形误差和姿态角度的偏差都会在扫描的结果中引入误差项，并通过均方根的形式叠加到真实光斑之中，但是对于几十微米量级的聚焦光斑的测量，以上讨论的误差项的影响都在亚微米级，可以忽略。焦斑尺寸和镜面面形的曲率误差有着几乎相同的变化趋势，焦斑逐渐减

小且光强不断增加。唯一的例外是第三次相位补偿后,焦斑有所增大。但在这次测量中聚焦光的光强仍在增加,这可能是入射光斑的抖动所致。通过第

四次相位补偿后,这一情况得到了修正。经过四次相位补偿,焦斑尺寸从初始的 $43.4 \mu\text{m}$ 被优化到了 $12.9 \mu\text{m}$,得到了显著的改善。

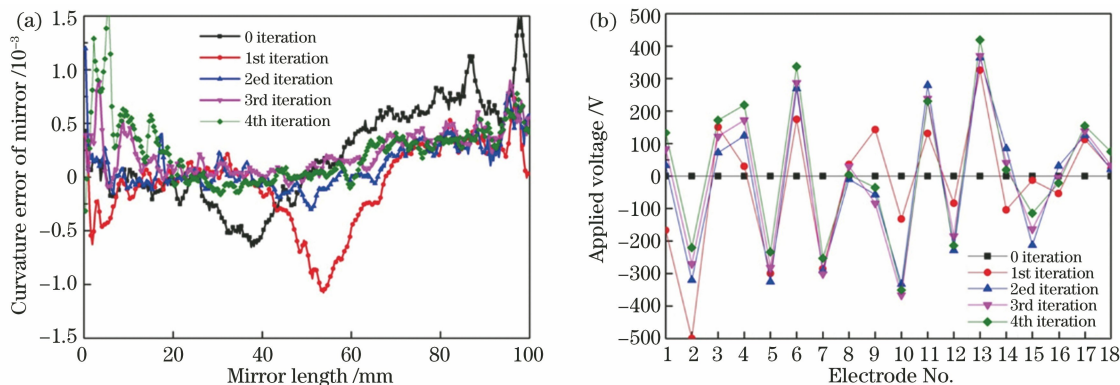


图 8 在线相位补偿结果。(a)曲率误差;(b)促动器电压变化

Fig. 8 Results of *in situ* phase compensation. (a) Wavefront curvature errors; (b) voltage change of actuator

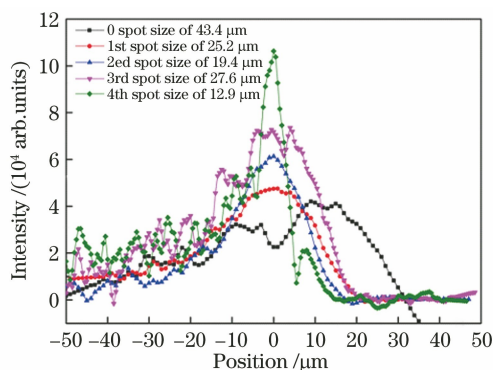


图 9 相位补偿后焦点的 4 次刀口扫描结果

Fig. 9 Profiles at focal point with 4 knife-edge scans after phase compensation

5 结 论

设计和加工了一台压电变形镜,研究了该压电变形镜的工作特性,并实现了同步辐射 X 射线波前的高精度相位补偿。利用有限元分析的方法,模拟了相位补偿镜的压电驱动变形特性,并使用干涉仪离线研究了相位补偿镜真实的面形变化规律。提出了适用于相位补偿镜的面形调控方法——迭代全局优化算法,并使用这种算法调整镜面面形,使其通过迭代快速逼近一个预设的目标面形。将此面形调控方案运用到散斑扫描在线测量方法中,在上海光源的硬 X 射线微聚焦线站实现了对聚焦光的在线相位补偿。结果表明,在 4 次迭代调控后,相位补偿镜的曲率半径曲线趋于平整,镜面曲率误差显著减小,垂直聚焦光斑尺度从初始的 $43.4 \mu\text{m}$ 被压缩到了 $12.9 \mu\text{m}$ 。所得结论为基于相位补偿的硬 X 纳米聚焦的实现打下了良好的基础。未来会将散斑测量和

补偿镜面形调控相结合,实现相位补偿系统的自动化控制,并在纳米探针线站对整套系统进行测试。

参 考 文 献

- [1] Pfeiffer F, Bech M, Bunk O, et al. Hard-X-ray dark-field imaging using a grating interferometer [J]. *Nature Materials*, 2008, 7(2): 134-137.
- [2] Moukhametzianov R, Burghammer M, Edwards P C, et al. Protein crystallography with a micrometre-sized synchrotron-radiation beam [J]. *Acta Crystallographica Section D Biological Crystallography*, 2008, 64(2): 158-166.
- [3] Zheng M Z, Cai C, Hu Y, et al. Spatial distribution of arsenic and temporal variation of its concentration in rice [J]. *New Phytologist*, 2011, 189(1): 200-209.
- [4] Matsuyama S, Shimura M, Mimura H, et al. Trace element mapping of a single cell using a hard X-ray nanobeam focused by a Kirkpatrick-Baez mirror system [J]. *X-Ray Spectrometry*, 2009, 38(2): 89-94.
- [5] Ice G E, Budai J D, Pang J W L. The race to X-ray microbeam and nanobeam science [J]. *Science*, 2011, 334(6060): 1234-1239.
- [6] Mimura H, Matsuyama S, Yumoto H, et al. Hard X-ray diffraction-limited nanofocusing with Kirkpatrick-Baez mirrors [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(18): 539-542.
- [7] Keskinbora K, Robisch A L, Mayer M, et al. Multilayer Fresnel zone plates for high energy radiation resolve 21 nm features at 1.2 keV [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18440-18453.
- [8] Huang Q S, Li H C, Song Z Q, et al. Hard X-ray

- one dimensional nano-focusing at the SSRF using a WSi_2/Si multilayer Laue lens[J]. Chinese Physics C, 2013, 37(2): 028002.
- [9] Snigirev A, Kohn V, Snigireva I, et al. A compound refractive lens for focusing high-energy X-rays [J]. Nature, 1996, 384(6604): 49-51.
- [10] Huang X J, Xu W H, Nazaretski E, et al. Hard X-ray scanning imaging achieved with bonded multilayer Laue lenses[J]. Optics Express, 2017, 25(8): 8698-8704.
- [11] Murray K T, Pedersen A F, Mohacsi I, et al. Multilayer Laue lenses at high X-ray energies: performance and applications [J]. Optics Express, 2019, 27(5): 7120-7138.
- [12] Mimura H, Handa S, Kimura T, et al. Breaking the 10 nm barrier in hard-X-ray focusing [J]. Nature Physics, 2010, 6(2): 122-125.
- [13] Li A G, Jiang H, Wang H, et al. Current status of the hard X-ray nanoprobe beamline at the SSRF [J]. SPIE, 103890: 103890J
- [14] Yamauchi K, Mimura H, Inagaki K, et al. Figuring with subnanometer-level accuracy by numerically controlled elastic emission machining [J]. Review of Scientific Instruments, 2002, 73(11): 4028-4033.
- [15] Hubert P, Tania A, Tarik A, et al. Developments of piezo deformable mirrors[J]. SPIE, 9909: 99097Z.
- [16] Yan W, Chen Z H, Du T J, et al. Numerical simulation of correction thermal blooming based on deformable mirror eigen mode [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1101001.
闫伟, 陈志华, 杜太焦, 等. 基于变形镜本征模式法校正大气热晕的数值模拟 [J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1101001.
- [17] Susini J, Laberge D, Zhang L. Compact active/adaptive X-ray mirror: bimorph piezoelectric flexible mirror[J]. Review of Scientific Instruments, 1995, 66(2): 2229-2231.
- [18] Vannoni M, Freijo Martín I, Siewert F, et al. Characterization of a piezo bendable X-ray mirror[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2016, 23(1): 169-175.
- [19] Huang L, Xue J P, Idir M. Controlling X-ray deformable mirrors during inspection [J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2016, 23(6): 1348-1356.
- [20] 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(3): 729-736.
- [21] Sutter J, Alcock S, Sawhney K. *In situ* beamline analysis and correction of active optics[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2012, 19(6): 960-968.
- [22] Berujon S, Ziegler E. Grating-based at-wavelength metrology of hard X-ray reflective optics[J]. Optics Letters, 2012, 37(21): 4464-4466.
- [23] Berujon S, Wang H C, Alcock S, et al. At-wavelength metrology of hard X-ray mirror using near field speckle[J]. Optics Express, 2014, 22(6): 6438-6446.
- [24] Jiang H, Yan S, Tian N X, et al. Extraction of medium-spatial-frequency interfacial waviness and inner structure from X-ray multilayers using the speckle scanning technique [J]. Optical Materials Express, 2019, 9(7): 2878-2891.
- [25] Wang H C, Sutter J, Sawhney K. Advanced *in situ* metrology for X-ray beam shaping with super precision[J]. Optics Express, 2015, 23(2): 1605-1614.
- [26] Tang H C, Li D H, Li L, et al. Planar object surface shape speckle pattern deflectometry based on digital image correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(2): 0212006.
汤海潮, 李大海, 李磊, 等. 基于数字图像相关的平面物体面形散斑图形偏折术 [J]. 光学学报, 2019, 39(2): 0212006.
- [27] Cerbino R, Peverini L, Potenza M A C, et al. X-ray-scattering information obtained from near-field speckle[J]. Nature Physics, 2008, 4(3): 238-243.
- [28] Tian N X, Jiang H, Li A G, et al. Influence of diffuser grain size on the speckle tracking technique [J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2020, 27(1): 146-157.