

同步辐射中双压电片反射镜的研究现状

张瑶 汤善治 李明 王立超 高俊祥

Present research status of piezoelectric bimorph mirrors in synchrotron radiation sources

Zhang Yao Tang Shan-Zhi Li Ming Wang Li-Chao Gao Jun-Xiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 010702 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.010702

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.010702>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于分子束外延生长的 1.05 eV InGaAsP 的超快光学特性研究

Study on photoluminescence properties of 1.05 eV InGaAsP layers grown by molecular beam epitaxy

物理学报.2015, 64(17): 177802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.177802>

表面态调控对 GaN 荧光光谱的影响

Effects of controlled surface states on the photoluminescence emission of GaN film

物理学报.2014, 63(13): 137802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.137802>

基于 VO₂ 薄膜相变原理的温控太赫兹超材料调制器

Thermally controlled terahertz metamaterial modulator based on phase transition of VO₂ thin film

物理学报.2013, 62(13): 130702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.130702>

InN 的光致发光特性研究

Study on the photoluminescence properties of InN films

物理学报.2013, 62(11): 117802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.117802>

综述

同步辐射中双压电片反射镜的研究现状*

张瑶¹⁾²⁾ 汤善治¹⁾ 李明^{1)†} 王立超³⁾ 高俊祥¹⁾⁴⁾

1)(中国科学院高能物理研究所, X 射线光学与技术实验室, 北京 100049)

2)(中国科学院大学物理学院, 北京 100049)

3)(北京纵横机电技术开发公司, 北京 100094)

4)(北京科技大学, 北京 100083)

(2015 年 8 月 22 日收到; 2015 年 9 月 24 日收到修改稿)

反射镜是同步辐射光束线中应用广泛的光学元件之一, 双压电片反射镜由于具有结构简单、面形能动以及自适应可调等优点, 逐渐引起同步辐射界的重视. 本文综述了同步辐射中双压电片反射镜的研究现状. 主要讨论了双压电片反射镜的工作原理和研究概况, 包括在几个大型同步辐射装置中的结构特点、制备技术及面形校正结果等; 简要介绍了双压电片反射镜面形校正时所采用的反射波前探测技术和反馈控制算法; 最后总结了其发展中存在的关键问题, 并展望了其未来的发展方向.

关键词: 同步辐射, 自适应, 双压电片反射镜, X 射线

PACS: 07.60.-j, 07.85.Qe, 07.85.Fv, 41.50.+h

DOI: 10.7498/aps.65.010702

1 引言

同步辐射光源经历了从第一代光源到第三代光源的发展, 是一种具有高亮度和低发射度的高品质光^[1], 被广泛地应用于物理学、化学、材料科学等领域^[2-5]. 将这样的光有效传递到实验样品, 对光束线中光学元件的聚焦性能要求极高^[6-9]. 在同步辐射光束线中, 反射镜是最常用的聚焦光学元件之一, 一般通过对硬质材料进行抛光或压弯来实现, 其面形精度是影响其聚焦性能的重要因素. 与抛光镜相比, 压弯镜由于具有面形可调的特点, 可以满足不同的聚焦条件要求, 因此压弯镜的研制是同步辐射中的一个重要研究课题. 最初同步辐射领域的研究人员所研制的传统压弯镜是在机械力矩的作用下形成的^[10-17], 目前在自适应光学技术的基础上, 利用双压电片反射镜 (piezoelectric bimorph mirror, PBM) 的弯曲原理, 又研制了一种自适应式

压弯镜^[18].

自适应光学技术是一种将自动控制的精密机械技术与光学技术相结合的新技术, 通过对光学波前实时探测、控制、校正, 使系统具有自动适应外界变化而保持良好工作状态的能力^[19-22], 一直以来被广泛用于天文观测、激光传输和人眼视网膜成像等领域^[23-28]. 与传统的机械压弯镜相比, 自适应式压弯镜具有以下突出优势^[29-31]: 1) 机械结构简单; 2) 面形能动且自适应可调, 能够进一步提高镜子面形精度; 3) 面形校正过程程序化, 从而减小了对实验人员的依赖程度; 4) 可校正光束线中其他光学元件引起的波前畸变, 进一步改善了聚焦条件. 同步辐射中 PBM 面形的自适应校正频率约为 10^{-2} Hz^[32], 该频率远低于天文观测中的自适应波前校正频率 (10^2-10^3 Hz), 但同步辐射中 PBM 的面形校正精度远高于天文观测中的波前校正精度. 这是由于在天文观测中, 由星体发出的可见光垂直入射到波前校正器, 然后通过自适应光学技术完成

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 11005123) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lim@ihep.ac.cn

波前畸变的校正;而在同步辐射中,由光源发出的X射线掠入射到反射镜表面,然后通过自适应光学技术完成反射镜面形的校正.在同样实现衍射极限聚焦的情况下,由于X射线波长短、入射角度大,对校正精度的要求较天文观测中的更高[33-35].

同步辐射光束线中自适应式压弯镜的应用研究始于20世纪90年代,欧洲同步辐射光源(ESRF)首先利用两块具有不同热膨胀系数的金属来构成自适应式压弯镜[36,37],通过温度来控制镜面的曲率.但由于温度控制不易实现,ESRF又于1994年制造了第一个单电极PBM[18],通过电压来控制镜面的曲率,同时也研究了适用于X射线领域的波前探测技术和反馈控制算法[38-40],并通过实验验证了PBM在同步辐射中应用的可行性.随后,英国钻石同步辐射光源(Diamond),日本大型同步辐射光源(SPring-8)等对PBM的结构、制备技术等不断地优化改进,对高精度波前探测技术和反馈控制算法不断地探索,进一步提高了PBM的面形精度和稳定性.然而,PBM在同步辐射领域中的应用研究目前仍处于探索阶段,还存在一些待解决的问题,需要进一步的研究,尤其在国内外同步辐射领域的应用研究几乎处于空白.

本文首先介绍了同步辐射中PBM的工作原理;进一步详细介绍了PBM的制备技术和结构的发展历程,以及在几个大型同步辐射装置中的应用情况;然后简要介绍了X射线的波前探测技术和反馈控制算法;最后分析了同步辐射中自适应式压弯镜存在的问题并对其未来的发展方向和研究思路进行了展望.

2 PBM的基本原理

在同步辐射中,PBM由双层压电陶瓷片(锆钛酸铅,PZT)和粘接在其表面的光学反射材料构成[18],如图1(a)所示,双层压电陶瓷片由两个极化方向相同的压电陶瓷片粘接而成,是PBM的主要部分,这也是PBM的名字由来.两个压电陶瓷片粘接的界面上镀有控制电极,压电陶瓷片与光学反射材料粘接的两个界面上均镀有接地电极,施加如图1(b)所示的电压后,由于压电陶瓷的横向逆压电效应,其中一个压电陶瓷片横向收缩,而另一个压电陶瓷片横向拉伸,从而使其双层结构弯曲,如图1(c)所示,并带动光学反射材料弯曲.因为压电陶瓷具有疏松多孔的显微结构[41],通过光学加工

其致密度难以达到同步辐射中对反射面形精度的要求,因此双层压电陶瓷片自身不能充当光学反射面,须在其表面镀有光学反射材料以形成X射线反射镜,即PBM.

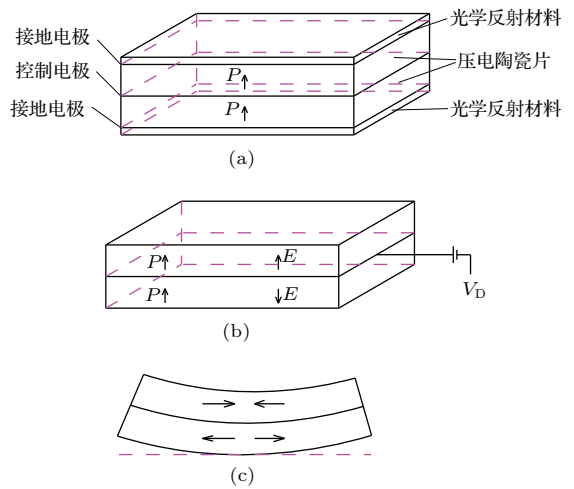


图1 (a) PBM的结构图;(b)双层PZT加电压示意图;(c)双层PZT弯曲的侧视图
Fig. 1. (a) Structure of PBM; (b) bimorph with the voltage; (c) side view of the bent bimorph.

由于PBM的弯曲面形与所加电压有密切关系,因此在自适应光学技术中,PBM的面形与电压分布之间的关系式一直是科研人员关心的重点[42-45].最初,由于天文观测中的特殊要求,PBM一般是较大、较薄的结构,为此Kokorowski[46]利用薄板小挠度理论推导得出了PBM在无限大且很薄的情况下的变形公式为

$$\nabla^2 r(x, y) = K \cdot V(x, y), \quad (1)$$

式中, $r(x, y)$ 为PBM的面形位移, $V(x, y)$ 为其反射面上的电压分布, K 为与材料及结构有关的常数.可见无限大的薄PBM的面形位移与电压分布满足泊松方程.然而在同步辐射中,考虑到加工难度,PBM的厚度不能太小,上述的薄板小挠度理论不再适用.Susini等[18]在梁压弯理论的基础上,推导得出同步辐射中的PBM在子午和弧矢方向的曲率半径相同,且与电压的关系为

$$R = \frac{t^2}{\alpha d_{31} V}, \quad (2)$$

式中, α 为与PBM的材料和结构有关的常数; d_{31} , t 和 V 分别为压电陶瓷的压电系数、PBM的厚度和外加电压.由(2)式可知,对于一定结构的PBM,如果整个反射面上 V 恒定,可得到曲率一定的球面镜,否则,可得到变曲率的非球面镜.通常同步辐

射中采用的反射镜面形有球面镜、柱面镜和椭圆柱面镜等, 均可由电压可控的PBM实现. PBM中变化的电压可以通过电阻膜^[47,48]或分离电极实现, 但由于电阻膜会使制备难度增加, 故目前常用分离电极来实现变化的电压. 另外, PBM的曲率半径与其厚度有关, 在一定电压作用下, 厚度越小, 压弯范围越大, 而较大的压弯范围是同步辐射中对反射镜的一个重要要求, 但是太小的厚度会对光学反射面的抛光处理造成困难, 因此PBM厚度的确定需综合考虑压弯范围和抛光难易程度^[30].

3 PBM研究概况

3.1 ESRF研制的PBM

作为传统压弯镜的代替品, ESRF于1994年研制了含有一个电极的PBM^[18,30], 即单电极PBM. 其中的压电陶瓷材料采用PZT, 这是因为PZT具有较大的机电耦合因子、压电系数、居里温度和极限应力, 可以满足PBM的要求; 光学反射材料采用易于抛光的Si晶体. PBM的结构根据有限元分析和实际加工水平来确定, 其长、宽、厚分别为150, 45, 18 mm, PZT和Si的厚度分别为8和1 mm, Si厚度的确定考虑了压弯范围和抛光难度, 可视为一个经验参数; 另外, 由于加工技术的限制, 所能制造的PZT的最大长度为150 mm, 同时由于PBM主要用于一维聚焦, 其宽度一般较小. PBM采用Si-PZT-PZT-Si的层对称结构, 可避免温度变化时由于PZT和Si的热膨胀系数不同而引起的面形局部隆起. PBM的制备过程为: 首先在PZT上沉积电极, 与另一块PZT粘接形成双层结构, 并在该双层结构的两个表面上沉积电极, 然后粘接Si晶体, 最后对Si晶体表面进行抛光处理. 其制备难点在于粘接和抛光两个过程. ESRF首先利用干涉仪对该PBM做系统性检测, 结果表明, 当施加电压后可形成曲率恒定的球面镜, 且干涉仪所测结果与上述理论计算结果很接近, 如图2所示, 从而验证了上述理论的正确性; 然后将该PBM置于ESRF的光束线中, 当电压为-1500 V时, 得到最小的聚焦光斑, 其半宽度为35 μm , 是光源发出光斑半宽度的1/18, 此时PBM的面形误差约为3 $\mu\text{rad rms}$. 由此可见, PBM在同步辐射中具有潜在的应用价值.

随后, ESRF又研制了含有六个电极的PBM, 即六电极PBM, 如图3所示, 它的材料、基本结构、制备过程与上述单电极PBM一样, 只是在沉积电

极时, 两个PZT界面上的控制电极改为具有一定间隔的六个电极, 而且电极数量和形状的改变丝毫不增加制备的难度. 与单电极PBM相比, 多电极PBM除了可以实现曲率可调(面形能动可调)外, 还可以实现面形的局部校正(面形的自适应校正), 可见多电极PBM可以用作自适应式压弯镜. 将该六电极PBM置于ESRF的光束线ID-13上, 经面形自适应校正后, 对半宽度为26 μm 的光源聚焦得到半宽度为14 μm 的焦斑, 且校正后的面形是斜率误差为2 $\mu\text{rad rms}$ 的椭圆柱面, 这与干涉仪测得的结果一致. 另外, 该PBM的稳定性测试结果表明其具有较好的稳定性: 几个小时后再次测量焦斑大小, 其半宽度的改变小于5%.

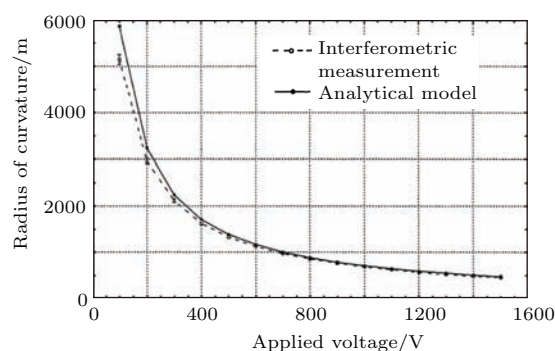


图2 理论结果与干涉仪测量结果^[30]

Fig. 2. The results of theoretical calculation and interferometer measurement^[30].

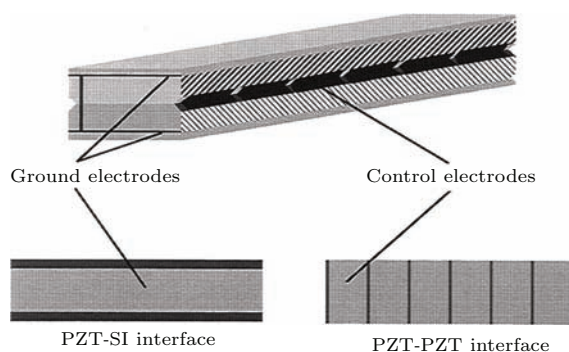


图3 ESRF的六电极PBM^[30]

Fig. 3. PBM with six electrodes in ESRF^[30].

ESRF与其合作伙伴SESO共同加工了10个PBM^[32], 并用于ESRF各个光束线中, 它们的长度均为150 mm, 宽度为40—45 mm, 厚度为15—18 mm. 由于有的PBM难以达到束线中要求的压弯范围, 于是一般将其光学反射面抛光成具有一定曲率的柱面镜, 其曲率约为光束线要求的平均曲率. 另外, 在PBM的加工过程中, Si晶体容易断裂, 这可能是由Si与PZT的热膨胀系数不一致

或其晶体本身的特性造成的. 因此, 后来又尝试采用一些非晶体作为光学反射材料, 如石英玻璃、碳化硅等. 目前 SESO 公司与多个大型同步辐射机构合作 [49], 共加工了 60 多个 PBM, 成为具有丰富的 PBM 加工经验的公司.

3.2 Diamond 研制的 PBM

为提高 PBM 的面形精度, 可通过提高其面形的自适应校正精度和抛光精度两种途径来实现. 由于通过面形的自适应校正过程可补偿由抛光引起的部分面形误差, 所以最初的 PBM 制备过程中一般采用精度较低的普通抛光技术, 以降低 PBM 的加工成本. 目前随着对 PBM 的研究不断深入, 其面形的自适应校正精度也逐渐提高, 能够充分补偿由抛光造成的低频面形误差, 但是对中高频率面形误差(高频面形误差包含面形粗糙度)仍无能为力. 为了进一步提高 PBM 的面形精度, 可以从提高抛光精度着手, 而且当前抛光技术发展迅速, 可以达到亚纳米级均方值的面形误差. 如日本 JTEC 已商业化的抛光技术 EEM (elastic emission mechining) 是一种高精度的抛光技术, 可以改善中频的面形误差, 不过还难以改善高频的面形粗糙度. 2010 年, Sawhney 等 [50] 报道, Diamond 研制了一个采用先进抛光技术 EEM 的 PBM, 如图 4 所示, 所采用的压电陶瓷材料仍为 PZT, 光学反射面为石英玻璃, 其基本结构类似于 ESRF 所研制的 PBM, 即 Si-PZT-PZT-Si 的层对称结构, 长和宽分别为 150 和 45 mm, 石英玻璃的厚度为 1 mm, 含有 8 个电极, 即八电极 PBM.



图 4 Diamond 研制的 PBM [50]

Fig. 4. PBM in Diamond [50].

由于先进抛光技术 EEM 的采用, PBM 的制备过程变得较为复杂: 首先 SESO 将粘接完成的

PBM 的光学反射面进行普通抛光处理, 得到面形误差为 8 nm rms (对应的斜率误差为 1.03 μ rad rms) 的柱面; 然后运往日本进行 EEM 处理, 使其面形成为满足 Diamond 光束线 B16 要求的椭圆柱面, 且经拼接干涉仪测得的面形误差为 0.5 nm rms, 如图 5 中的红线所示, 可见 EEM 的精度远远高于普通抛光技术的精度; 最后将经过 EEM 处理的 PBM 运回 Diamond 的光学测量实验室, 并联接供电设备, 在未施加电压的情况下, 经纳米形貌测量仪 (NOM) [51,52] 测量发现其面形呈现“W”形, 如图 5 中的绿线所示, 其面形误差远远大于 0.5 nm rms. 造成面形误差变大的原因可能有: 运输过程的影响、抛光的后续反应、环境变化或一些附加设备(支撑设备或供电设备)的影响等, 由这些原因造成的误差属于低频面形误差, 可通过面形的自适应校正过程来校正, 校正后的面形误差减小为 0.66 nm rms (对应的斜率误差为 140 nrad rms), 如图 5 中的蓝线所示, 其面形精度基本恢复为 EEM 处理后的精度. 将该 PBM 置于光束线 B16 上, 通过面形的自适应性校正使其由椭圆柱面 E1 ($P = 46.5$ m, $Q = 0.4$ m, $\theta = 3$ mrad) 转变为椭圆柱面 E2 ($P = 46.5$ m, $Q = 0.33$ m, $\theta = 2.5$ mrad), 其中的 P , Q , θ 分别为光源到 PBM 的距离、PBM 到焦点的距离、掠入射角, 校正后的面形误差均小于 1 nm rms (对应的斜率误差约为 0.2 μ rad rms) [53]. 可见, 采用 EEM 技术的 PBM, 可同时实现高面形精度和面形能动可调, 而且是第一个能达到亚纳米级均方值面形误差的 PBM, 因此这是同步辐射领域中反射镜研究的一个关键突破.

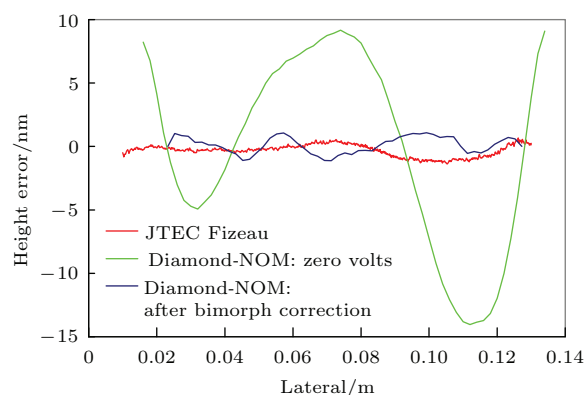


图 5 Diamond 的 PBM 测试结果 [50]

Fig. 5. The measured results of PBM in Diamond [50].

3.3 SPring-8研制的PBM

在过去的十多年, 第三代同步辐射装置的建设推动了纳米聚焦光学元件的飞速发展, 目前已经有商业化的衍射极限聚焦光学元件, 如光栅、多层膜反射镜和波带片等, 但是具有能动可调性的衍射极限聚焦光学元件仍然处于探索研究阶段^[54-57]. 最近, Spring-8 试图研制一个用于实现衍射极限聚焦的自适应式压弯镜^[58], 其基本结构不同于ESRF的PBM, 如图6所示, 其中有一块长、宽、厚分别为100, 50, 5 mm的石英玻璃、4个长、宽、厚分别为100, 17.5, 1 mm的PZT, 4个PZT分别粘接在石英玻璃两侧的上下表面, 且每个PZT上均镀有18个长、宽分别为17.5, 4.8 mm的电极, 电极间隔为0.8 mm, 石英玻璃的中间区域用作光学反射面, 并镀有铂以提高X射线的反射率.

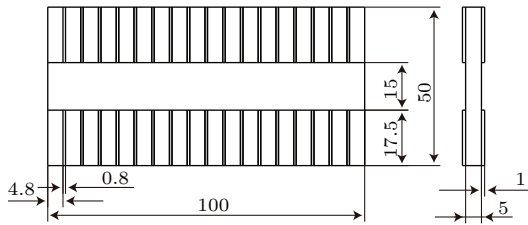


图6 Spring-8的PBM结构图(单位为mm)^[58]

Fig. 6. The structure of PBM in Spring-8 (the unit is mm)^[58].

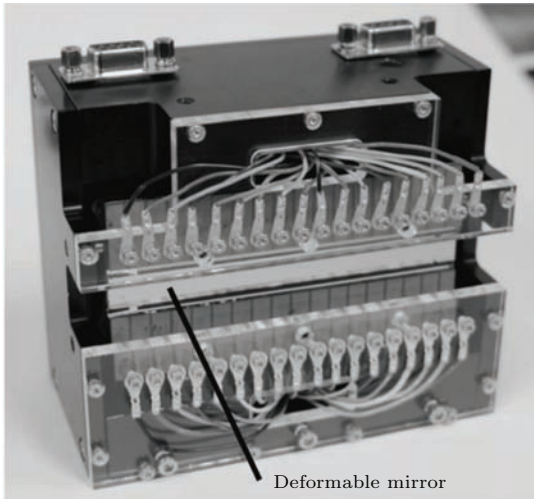


图7 Spring-8研制的PBM^[57]

Fig. 7. PBM in Spring-8^[57].

由于结构上的差异, 该PBM的制备过程也稍有不同, 制备时先对石英玻璃做抛光处理, 然后在其上粘接PZT, 这避免了难以抛光或由抛光引起的粘接胶变质等问题. 该PBM另一个主要特点是电

极数多, 且每个电极所占的区域很小, 这使得面形可控区域较小(约20 mm), 从而提高了面形的自适应校正精度, 使衍射极限聚焦成为可能. 将该PBM安装在支撑设备上, 并连接供电设备, 如图7所示, 然后置于Spring-8的光束线BL29-XUL中, 在光束线BL29-XUL中实现衍射极限聚焦要求PBM的面形为误差小于3 nm PV的椭圆柱面. 通过面形的自适应校正, 所得面形在75 mm处存在一个5 nm高的阶跃误差, 如图8所示, 除了这个特殊点, 其余面形误差达到2 nm PV, 接近衍射极限聚焦的要求. 为了完全实现衍射极限聚焦, 需进一步分析引起阶跃误差的原因.

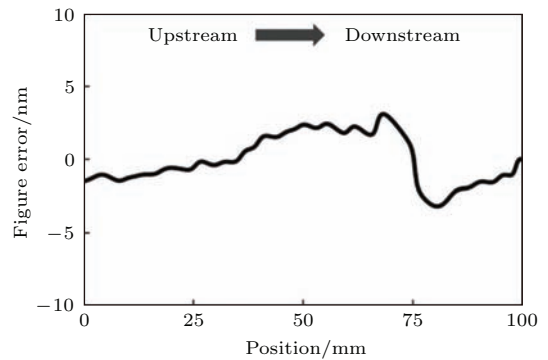


图8 Spring-8的PBM测试结果^[57]

Fig. 8. The measured result of PBM in Spring-8^[57].

3.4 多段复合PBM

由于所能加工的PZT最大长度为150 mm, 因此前面所述的PBM的长度均等于或小于150 mm. 为了制造更长的自适应式压弯镜, ESRF 提出将多个150 mm长的双层PZT结构依次粘接在两块石英玻璃之间, 构成多段复合PBM (multi-segmented PBM). 为此, ESRF于1997年制造了两个多段复合PBM^[59,60], 如图9所示, 其中M1含有3个双层PZT结构(450 mm), M2含有5个双层PZT结构(750 mm), 每个双层PZT结构中含有一个电极. M1和M2的石英玻璃两侧分别镀有金属铂和铬, 因此它们的反射面有三个不同的反射区域: 铂、铬和石英玻璃, 这三个区域的截止能量不同, 可使多段复合PBM工作在三种不同频率的X射线下. M1和M2中均含有奇数个双层PZT结构, 主要是为了避免它们中间存在两个双层PZT结构的机械接点而使反射面形受到影响, 而且所用的石英玻璃比较厚, 以保证光学反射面的力学连续性.

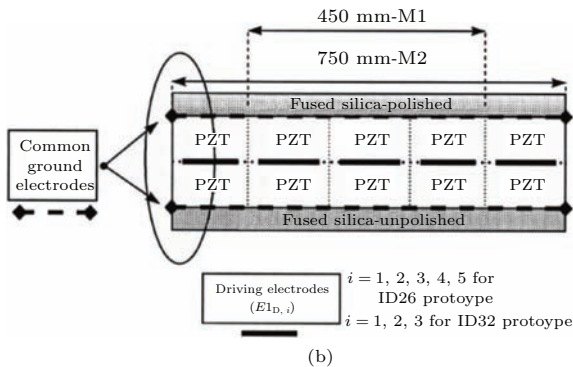
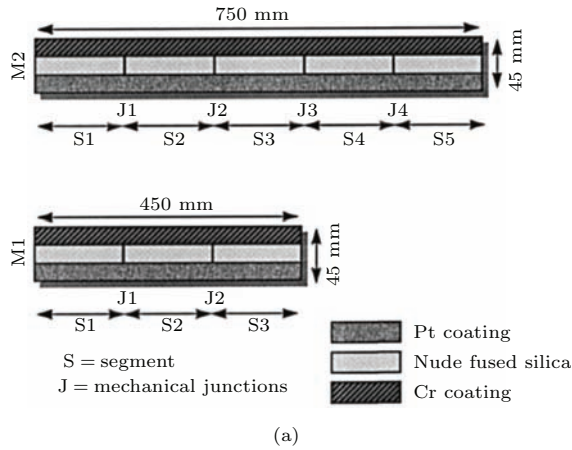


图9 (a) ESRF的多段复合PBM俯视图[32]; (b) ESRF的多段复合PBM侧视图[32]

Fig. 9. (a) Top view of multi-segmented PBM in ESRF [32]; (b) side view of multi-segmented PBM in ESRF [32].

利用长程面形仪(LTP)[61,62]对M1和M2做系统性的分析时, M1和M2面形均受到机械接点的影响, 如图10所示, 机械接点引起的面形局部隆起小于 $0.1\ \mu\text{m}$, 比由抛光引起的面形误差小一个数量级, 而且其大小不随所加电压的变化而变化. M2经面形的自适应校正后得到斜率误差为 $3.12\ \mu\text{rad rms}$ 的球面, 实现了预期的目标. 将M1和M2安装在ESRF的光束线ID32和ID26上, 经测试它们均具有很好的聚焦特性、重复性和稳定性, 它们在光束线上的成功运行证实了其实际可行性. 于是ESRF又于1998年研制了一个多段复合PBM, 即M3, M3与M1一样, 也含有3个双层PZT结构(450 mm), 不同的是M3的每个双层PZT结构含有两个电极, 与M1相比, 电极个数增多, 因此M3的可控面形区域更小, 面形校正精度更高. 另外, M3的制备过程中采用精度更高的抛光技术, 进一步提高了其面形精度. 将M3置于光束线ID26上, 经面形的自适应校正得到面形误差为 $24\ \text{nm rms}$ (相应的斜率误差为 $1.9\ \mu\text{rad rms}$)的球面, 也达到了预期的目标.

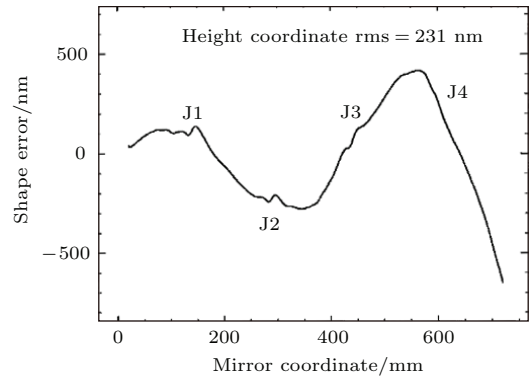


图10 M2的测试结果[32]

Fig. 10. The measured result of M2 [32].

为了进一步改善多段复合PBM的面形质量, Spring-8于2001年也研制了一个多段复合PBM[63,64], 即M4, 其中含有两个双层PZT结构(300 mm), 每个双层PZT结构含有两个电极. 与ESRF的多段复合PBM相比, Spring-8优化了基底的加工技术、简化了支撑设备及电连接设备, 另外, 在经过普通的抛光处理后, 又采用先进的抛光技术进行抛光. 在这些改进的基础上, 经LTP测试, M4的面形有所改善, 大大减小了机械接点的影响, 如图11所示. 将M4置于Spring-8的光束线BL29XUL上, 经过面形的自适应校正, 得到半宽度为 $8\ \mu\text{m}$ 的焦斑, 减小为光源光斑的40倍, 此时的面形为斜率误差为 $0.95\ \mu\text{rad rms}$ 的椭球面, 可见, Spring-8的多段复合PBM较ESRF有很大的进步.

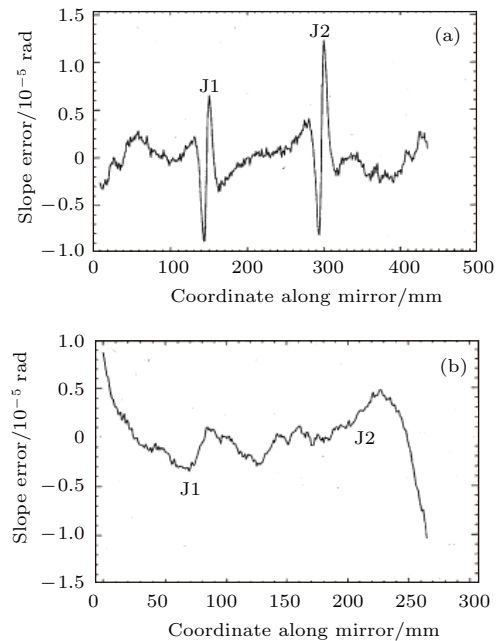


图11 (a) M3的测试结果[63]; (b) M4的测试结果[63]
Fig. 11. (a) The measured result of M3 [63]; (b) the measured result of M4 [63].

由于上述的多段复合PBM中,用于反射光束的石英玻璃表面下均存在机械接点,其面形精度难以进一步提高.最近,SESO研制了一个多段复合PBM^[65],其结构与3.3节中所述PBM的结构类似,PZT粘接在石英玻璃两侧的上下表面,从而使石英玻璃的反射区域下面不存在机械接点,进一步提高了其面形精度.

4 反射波前的探测技术

PBM面形的自适应校正过程中需要实时探测其面形或反射波前,然后利用反馈控制算法将探测信息转化为电压信息.因此,为了充分发挥PBM的优势,需要进一步研究X射线反射波前探测技术及反馈控制算法.将PBM放置在运行的光束线上之前,需要在光学测量实验室对其做系统性的分析,如线性度、重复性、滞后性、能动与自适应工作特性等,以便了解其基本性能和进一步优化.这时常用的面形探测设备有LTP, NOM和干涉仪等,这些均为同步辐射中常用的面形检测设备^[66].由于光学测量实验室中的检测环境与光束线中的环境不可能完全一样,因此PBM在光学测量实验室中的基本特性并不能完全反映其在光束线中的特性,因此测试其在光束线上的运行特性也是非常必要的.目前,X射线波段的波前探测技术有细光束法(pencil-beam method)^[38,67]、哈特曼探测法(Hartmann test)^[64]、相位迭代恢复法(phase retrieval method)^[68,69]和光斑追迹法(X-ray, speckle-tracking technique, XST)^[70]等.

细光束法是同步辐射中使用最早的一种波前探测技术,其基本原理如图12所示,入射光经过狭缝成为细光束,通过调节狭缝的位置和大小,使细光束入射到镜面上某个电极所在的范围,被镜面反射的细光束在焦平面处被Ce-YAG闪烁体接收并转化为可见光成像于电荷耦合器(CCD)上,由CCD可知反射光斑偏离焦点的距离 δy ,利用几何关系得该电极处的镜面斜率误差为

$$\delta s = \delta y / 2D, \quad (3)$$

其中, δs 为镜面的斜率误差, D 为镜面与相机间距.

细光束法原理简单、测量速度快,因此是同步辐射中最常用的波前探测方法.然而,对于电极数较多的PBM,细光束法体现出其局限性,这是由于当电极数增多时,每个电极对应的镜面区域减小,

相应的细光束截面减小,光束强度降低,经镜面反射后难以被CCD分辨,从而不能精确反映PBM的面形信息^[71].而相位迭代恢复法能够精确分辨小截面细光束的结构,弥补细光束法的不足,因此能够实现高精度的面形测量.SPring-8将细光束法与相位迭代恢复法结合对3.3节中的PBM进行面形的自适应校正^[58],校正过程为:1)将PBM安装在光束线上,并将离线面形校正时所得的电压值作为初始电压;2)由细光束法作为波前探测方法,进行粗略的面形自适应校正;3)进一步利用相位迭代恢复法进行精细的面形自适应校正.

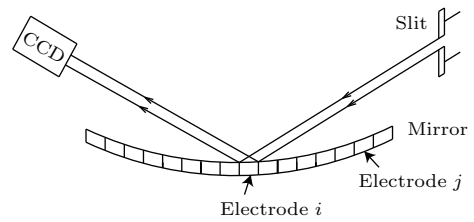


图12 细光束法原理图

Fig. 12. The schematic diagram of pencil-beam method.

除了相位迭代恢复法之外,光斑追迹法也是一种具有高分辨率的波前探测技术.Diamond分别利用细光束法、光斑追迹法和NOM测量了3.2节中PBM的响应函数曲线^[53],如图13所示,可以看出三种波前探测方法测得的响应函数曲线基本一致,其中细微的差别主要是由于三种方法的测量环境或测量时间不同造成的.

哈特曼探测法(Hartmann test)是一种手动的面形自适应校正方法,最初由Spring-8采用^[64].哈特曼探测的基本原理为:利用一组狭缝从入射光截取与电极数相同的几个子光束,调节狭缝的大小和位置使每个子光束恰好入射到各个电极所对应的镜面位置处,手动调节各电极的电压使各子光束经镜面反射后均到达探测器上的焦点位置.当入射光是理想的球面波时,校正后的镜面为椭圆柱面;当入射光是非理想的球面波时,校正后的镜面不再是椭圆柱面,而是“波前校正器”的面形.同步辐射光源发出理想的球面波,其光波经过光束线上的其他光学元件时,容易引起波前畸变,而哈特曼探测法可以校正由其他光学元件引起的波前畸变,2004年Signorato^[72]对此进行了详细说明.由于哈特曼探测法需要实验人员手动调节,因此使用较少,科研人员认为哈特曼探测法实现程序化是进一步的研究目标.

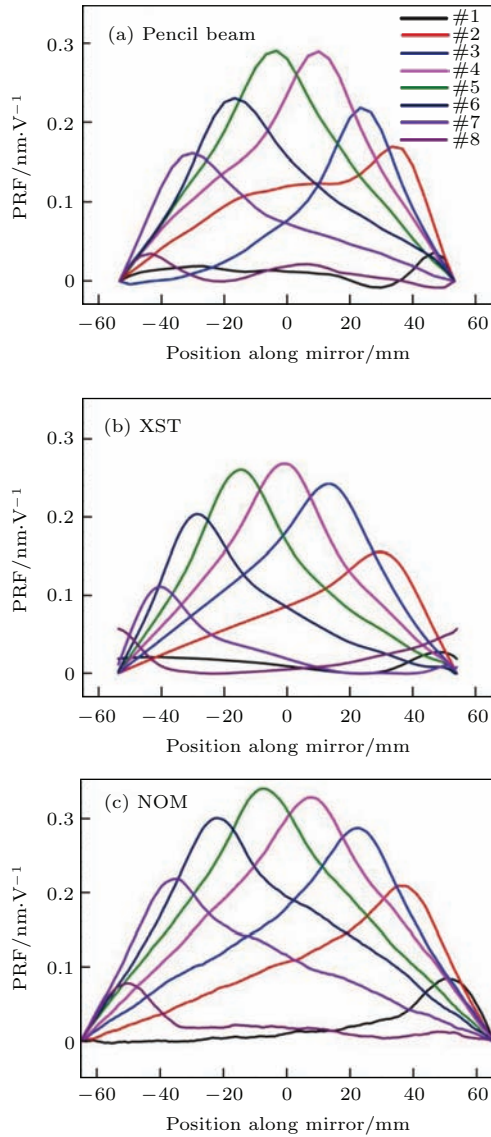


图 13 (a) 细光束法的测试结果^[70]; (b) XST 的测试结果^[70]; (c) NOM 的测试结果^[70]

Fig. 13. (a) The measured results of pencil-beam method^[70]; (b) the measured results of XST^[70]; (c) the measured results of NOM^[70].

5 面形的反馈控制算法

反馈控制算法的核心思想为将波前探测器得到的面形信息转化为电压信息. 若将PBM视为一个线性系统, 则存在一个描述其工作特性的响应函数矩阵, 对于不同的面形信息, 响应函数矩阵的意义不同. 若需要校正的面形信息为斜率时, 将电压与面形斜率建立如下矩阵关系^[59]:

$$\mathbf{s} = \mathbf{H}\mathbf{c} \quad (4)$$

式中, \mathbf{s} 是一个 $m \times 1$ 列向量, 用来表示镜面上 m 个点处的斜率, 即为斜率向量; \mathbf{c} 是一个 $n \times 1$ 列向量,

用来表示镜子 n 个电极上的电压, 即为电压向量; \mathbf{H} 为一个 $m \times n$ 矩阵, 即PBM的响应函数矩阵, 其元素 H_{ij} 表示第 j 个电极上加单位电压时镜面上第 i 个点处的斜率, 矩阵 \mathbf{H} 由实验测得. 若目标曲面的斜率为 \mathbf{s}_o , 实际测得的斜率为 \mathbf{s}_m , 则实际面形与目标面形之间的差距用斜率误差 $\delta\mathbf{s}$ 表示如下:

$$\delta\mathbf{s} = \mathbf{s}_m - \mathbf{s}_o = \mathbf{s}_m - \mathbf{H}\mathbf{c}. \quad (5)$$

使 $\|\delta\mathbf{s}\|^2 = (\delta\mathbf{s})(\delta\mathbf{s})^T$ 最小可求得所需的电压, 这实际上是一个最小二乘问题, 求解得到电压向量 \mathbf{c} 与斜率误差 $\delta\mathbf{s}$ 之间的关系为

$$\mathbf{c} = (\mathbf{H}^T\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^T\delta\mathbf{s}, \quad (6)$$

其中 \mathbf{H}^T 为 \mathbf{H} 的转置矩阵, 如果 $\mathbf{H}^T\mathbf{H}$ 是一个奇异矩阵, 则采用奇异值分解法: $\mathbf{H}^T\mathbf{H} = \mathbf{V}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T$, 其中 \mathbf{V} 的列向量是 $\mathbf{H}^T\mathbf{H}$ 的特征向量, $\mathbf{\Sigma}$ 是一个对角矩阵, 对角元素为 $\mathbf{H}^T\mathbf{H}$ 的特征值.

Huang^[73] 指出, 当电极数增加时, 由 (4) 式得到的各个电极的电压跳跃幅度较大, 使相邻两个电极间的电压差超出安全范围. 这是由于当电极数较大时, 响应函数矩阵 \mathbf{H} 的条件数较大, 这时矩阵 \mathbf{H} 和 $\delta\mathbf{s}$ 测量时的微小误差会导致所得结果 \mathbf{c} 产生较大的误差, 这就是矩阵运算中常见的矩阵病态性问题. 由于吉洪诺夫正则化是数学中常用的解决矩阵病态性问题的基本方法, 为此 Huang^[73] 将其用于解决 (4) 式中出现的矩阵病态问题, 结果得到各个电极的电压平缓变化.

6 总结与展望

PBM 被用于同步辐射领域以来, 经过 20 多年的发展, 已经研制了六十多个, 同时科研人员提出多种波前探测技术, 积累了大量经验, 为PBM在同步辐射领域的应用研究步向成熟奠定了扎实的基础. 其中 Diamond 将先进的抛光技术 EEM 与自适应式压弯技术结合, 制造了亚纳米级均方面形误差的 PBM; Spring-8 研制的 PBM 通过减小每个电极所在的区域, 在光束线中基本实现了衍射极限聚焦. 可见, PBM 的使用解决了同步辐射光束线领域中一直以来困扰科研人员的问题: 高精度和面形的能动可调不能同时实现.

然而在 PBM 的研制和使用中仍存在一些待解决的问题: PBM 由 PZT 与光学反射材料粘接而成的, 其黏接胶在受到同步辐射持续高温照射时容易变质, 导致面形精度降低; PBM 在电压驱动下形成

用于聚焦光束的曲面,然而一些附加设备,如支撑和供电设备会对其产生额外应力,从而影响面形精度,因此需要不断地改进这些附加设备以减小其对PBM产生的额外应力;在PBM制备过程中,电极沉积的均匀性、粘接时无气泡、抛光时无破坏等难以保证;对于多段复合PBM,由于机械接点的影响,精度难以提高,而通过改进加工技术或结构来避免机械接点影响的尝试还处于摸索阶段。

为了提高PBM面形自适应校正精度和效率,需要更高精度的反射波前探测技术和更快速、更精确的反馈控制算法。高精度的反射波前探测技术是实现高精度面形的前提,正如William Thomson和Lord Kelvin的经典描述“If you can not measure it, you can not improve it.”为实现衍射极限聚焦,X射线波段纳米级分辨率波前探测技术是进一步的研究目标。增加电极数量是提高PBM面形精度的有效途径,但电极数增多时,反馈控制算法较为复杂,运算速度变慢,因此探索高精度、高效率的反馈控制算法也是一项重要的任务。

参考文献

- [1] Qi J C, Ye L L, Chen R C, Xie H L, Ren Y Q, Du G H, Deng B, Xiao T Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 104202 (in Chinese) [戚俊成, 叶琳琳, 陈荣昌, 谢红兰, 任玉琦, 杜国浩, 邓彪, 肖体乔 2014 物理学报 **63** 104202]
- [2] Dong S Q, Li L Q, Liu P, Dong Y H, Chen X M 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4574
- [3] Zhang K, Li D E, Hong Y L, Zhu P P, Yuan Q X, Huang W X, Gao K, Zhou H Z, Wu Z Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 076801
- [4] Zhao Y J, Shan X B, Sheng L S, Wang Z Y, Zhang J, Yu C R 2011 *Chin. Phys. B* **20** 043201
- [5] Zhang S H, Wang J O, Qian H J, Wu R, Zhang N, Lei T, Liu C, Kurash I 2015 *Chin. Phys. B* **24** 027901
- [6] Li Y D, Lin X Y, Liu S G, He J L, Guo F, Sun T X, Liu P 2013 *Chin. Phys. B* **22** 044103
- [7] Le Z C, Dong W, Liu W, Zhang M, Liang J Q, Quan B S, Liu K, Liang Z Z, Zhu P P, Yi F T, Huang W X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1977 (in Chinese) [乐孜纯, 董文, 刘魏, 张明, 梁静秋, 全必胜, 刘凯, 梁中燾, 朱佩平, 伊福廷, 黄万霞 2010 物理学报 **59** 1977]
- [8] Howells M R, Cambie D, Duarte R M, Irich S, Macdowell A A, Padmore H A, Renner T R 2000 *Opt. Eng.* **39** 2748
- [9] Padmore H A, Howells M R, Irick S C, Renner T R, Sandler R, Koo Y M 1996 *Proc. SPIE* **2856** 145
- [10] Rommeveaux A, Hignette O, Morawe C 2005 *Proc. SPIE* **5921** 59210N
- [11] Rossetti D, Lienert U, Pradervand C, Schneider R, Shi M, Zelenika S, Rossat M, Hignette O, Rommeveaux A, Schulze-Briese C 2002 *Proc. SPIE* **4782** 86
- [12] Zhang L, Hustache R, Hignette O, Ziegler E, Freund A 1998 *J. Synchrotron Rad.* **5** 804
- [13] Heald S M 2011 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **649** 128
- [14] Howells M R 1993 *Opt. Eng.* **32** 1981
- [15] Mao C W, Xi Z J, Yu X N, Xiao T Q 2009 *Chin. Phys. C* **33** 687
- [16] Tseng T C, Wang D J, Perng S Y, Kuan C K, Lin J R, Chang S H, Chen C T 2003 *J. Synchrotron Rad.* **10** 450
- [17] Kamachi N, Endo K, Ohashi H 2004 *AIP Conf. Proc.* **705** 788
- [18] Susini J, Labergerie D, Zhang L 1995 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 2229
- [19] Hardy J W, Lefebvre J E, Koliopoulos C L 1977 *J. Opt. Soc. Am.* **67** 360
- [20] Jiang W H 1997 *Physics* **26** 73 (in Chinese) [姜文汉 1997 物理 **26** 73]
- [21] Hardy J W, Thommpson L 2000 *Phys. Today* **53** 69
- [22] Babcock H W 1953 *Publ. Astron. Soc. Pac.* **65** 229
- [23] Liu R X, Zheng X L, Li D Y, Xia M L, Hu L F, Gao Z L, Mu Q Q, Xuan L 2014 *Chin. Phys. B* **23** 094211
- [24] Lu J, Li H, He Y, Shi G H, Zhang Y D 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 034207 (in Chinese) [卢婧, 李昊, 何毅, 史国华, 张雨东 2011 物理学报 **60** 034207]
- [25] Liang C, Liao W H, Shen J X 2007 *Appl. Laser* **27** 237 (in Chinese) [梁春, 廖文和, 沈建新 2007 应用激光 **27** 237]
- [26] Jiang W H 1992 *Opto-Electron. Eng.* **19** 50 (in Chinese) [姜文汉 1992 光电工程 **19** 50]
- [27] Jiang W H, Zhang Y D, Rao C H, Ling N, Guan C L, Li M, Yang Z P, Shi G H 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0900106 (in Chinese) [姜文汉, 张雨东, 饶长辉, 凌宁, 官春林, 李梅, 杨泽平, 史国华 2011 光学学报 **31** 0900106]
- [28] Zhang Y D, Jiang W H, Shi G H, Ling N, Dai Y, Xue L X, Yu X, Rao C J 2007 *Sci. China Ser. G* **37** 68 (in Chinese) [张雨东, 姜文汉, 史国华, 凌宁, 戴云, 薛丽霞, 余翔, 饶学军 2007 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学 **37** 68]
- [29] Alcock S G, Sutter J P, Sawhney K J S, Hall D R, McAuley K, Sorensen T 2013 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **710** 87
- [30] Susini J, Labergerie D R, Hignette O 1996 *Proc. SPIE* **2856** 130
- [31] Signorato R, Hausermann D, Somayazulu M, Carre J F, Dinger U, Ota K 2004 *Proc. SPIE* **5193** 112
- [32] Signorato R, Hignette O, Goulon J 1998 *J. Synchrotron Rad.* **5** 797
- [33] Ling X D, Xue C, Liu X Y, Wang J L, Wei P F 2012 *Chin. Opt.* **5** 337 (in Chinese) [林旭东, 薛陈, 刘欣悦, 王建立, 卫沛锋 2012 中国光学 **5** 337]
- [34] Jiang W H 2006 *Chin. J. Nat.* **28** 7 (in Chinese) [姜文汉 2006 自然杂志 **28** 7]
- [35] Ning Y, Zhou H, Yu H, Rao C H, Jiang W H 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1089

- [36] Susini J, Baker R, Krumrey M, Schwegle W, Kwick Å 1995 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 2048
- [37] Susini J, Marot G, Zhang L, Ravelet R, Jagourel P 1992 *Rev. Sci. Instrum.* **63** 489
- [38] Hignette O, Freund A K, Chinchio E 1997 *Proc. SPIE* **3152** 188
- [39] Hignette O, Rommeveaux A 1996 *Proc. SPIE* **2856** 314
- [40] Signorato R, Sanchez del Rio M 1997 *Proc. SPIE* **3152** 136
- [41] Zhou H 2013 *Ph. D. Dissertation (Hefei: University of Chinese Academy of Sciences)* (in Chinese) [周虹 2013 博士学位论文 (合肥: 中国科学院大学)]
- [42] Steinhaus E, Lipaon S G 1979 *J. Opt. Soc. Am.* **69** 478
- [43] Halevi P 1983 *J. Opt. Soc. Am.* **73** 110
- [44] Jagourel P, Madec P Y, Sechaud M 1990 *Proc. SPIE* **1237** 394
- [45] Kudryashov A V 1996 *Opt. Eng.* **35** 3064
- [46] Kokorowski S A 1979 *J. Opt. Soc. Am.* **69** 181
- [47] Tseng T C, Chen S J, Yeh Z C, Perng S Y, Wang D J, Kuan C K, Chen J R, Chen C T 2001 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **467–468** 294
- [48] Tseng T C, Perng S Y, Lin J R, Wang D J, Chang S H 2002 *MEDSI02 Argonne, Illinois Republic, September 5–6, 2002* p271
- [49] Fermé J J 2007 *AIP Conf. Proc.* **879** 501
- [50] Sawhney K J S, Alcock S G, Signorato R 2010 *Proc. SPIE* **7803** 780303
- [51] Siewert F, Noll T, Schlegel T, Zeschke T, Lammert H 2004 *AIP Conf. Proc.* **705** 847
- [52] Alcock S G, Sawhney K J S, Scott S, Pedersen U, Walton R, Siewert F, Zeschke T, Noll T, Lammert H 2010 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **616** 224
- [53] Sawhney K, Alcock S, Sutter J, Berujon S, Wang H C, Signorato R 2013 *J. Phys.: Conf. Ser.* **425** 052026
- [54] Matsuyama S, Kimura T, Nakamori H, Imai S, Sano Y, Kohmura Y, Tamasaku K, Yabashi M, Ishikawa T, Yamauchi K 2012 *Proc. SPIE* **8503** 850303
- [55] Nakamori H, Matsuyama S, Imai S, Kimura T, Sano Y, Kohmura Y, Tamasaku K, Yabashi M, Ishikawa T, Yamauchi K 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 053701
- [56] Kimura T, Handa S, Mimura H, Yumoto H, Yamakawa D, Matsuyama S, Inagaki K, Sano Y, Tamasaku K, Nishino Y, Yabashi M, Ishikawa T, Yamauchi K 2009 *Jap. J. Appl. Phys.* **48** 072503
- [57] Kimura T, Handa S, Mimura H, Yumoto H, Yamakawa D, Matsuyama S, Sano Y, Tamasaku K, Nishino Y, Yabashi M, Ishikawa T, Yamauchi K 2008 *Proc. SPIE* **7077** 707709
- [58] Nakamori H, Matsuyama S, Imai S, Kimura T, Sano Y, Kohmura Y, Tamasaku K, Yabashi M, Ishikawa T, Yamauchi K 2013 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **710** 93
- [59] Signorato R 1998 *Proc. SPIE* **3447** 20
- [60] Signorato R 1999 *Proc. SPIE* **3773** 50
- [61] Qian S N, Jark W, Takacs P Z 1995 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 2562
- [62] Takacs P Z, Qian S N, Colbert J 1987 *Proc. SPIE* **0749** 59
- [63] Signorato R, Carre J F, Ishikawa T 2001 *Proc. SPIE* **4501** 76
- [64] Signorato R, Ishikawa T 2001 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A* **467–468** 271
- [65] Idir M, Mercere P 2013 *Adaptive Optics: Methods, Analysis and Applications 2013* Arlington, USA, June 23–27, 2013 OM3A.1
- [66] Siewert F, Buchheim J, Höft T, Fiedler S, Bourenkov G, Cianci M, Signorato R 2012 *Meas. Sci. Technol.* **23** 1
- [67] Sutter J, Alcock S, Sawhney K 2012 *J. Synchrotron Rad.* **19** 960
- [68] Kimura T, Mimura H, Handa S, Yumoto H, Yokoyama H, Imai S, Matsuyama S, Sano Y, Tamasaku K, Komura Y, Nishino Y, Yabashi M, Ishikawa T, Yamauchi K 2010 *Rev. Sci. Instrum.* **81** 123704
- [69] Mimura H, Yumoto H, Matsuyama S, Handa S, Kimura T, Sano Y, Yabashi M, Nishino Y, Tamasaku K, Ishikawa T, Yamauchi K 2008 *Phys. Rev. A* **77** 015812
- [70] Bérujon S, Ziegler E, Cerbino R, Peverini L 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 158102
- [71] Sawhney K, Wang H C, Sutter J, Alcock S, Berujon S 2013 *Synchrotron Radiation News* **26** 17
- [72] Signorato R 2004 *AIP Conf. Proc.* **705** 812
- [73] Huang R 2011 *J. Synchrotron Rad.* **18** 930

REVIEW

Present research status of piezoelectric bimorph mirrors in synchrotron radiation sources*

Zhang Yao¹⁾²⁾ Tang Shan-Zhi¹⁾ Li Ming^{1)†} Wang Li-Chao³⁾ Gao Jun-Xiang¹⁾⁴⁾

1) (*Laboratory of X-ray Optics and Technology, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, School of Physics, Beijing 100049, China*)

3) (*Beijing Zhongheng Electro-Mechanical Technology Development Co., Beijing 100094, China*)

4) (*University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China*)

(Received 22 August 2015; revised manuscript received 24 September 2015)

Abstract

The third-generation synchrotron radiation sources are widely used in physics, chemistry, material science, etc. due to their light beams with high brilliance and low emittance. In order to efficiently utilize such light beams for scientific research, reflective mirrors with excellent figure quality are required. The reflective mirrors on the beamlines of synchrotron radiation sources consist of fixed polished shape mirrors and bendable mirrors. Bendable mirrors have been attracting the attention of the synchrotron radiation community because their curvatures can be varied to realize different focusing properties. Classical bendable mirrors are realized by applying mechanical moment at the ends of the mirror substrates. In this paper, we introduce a new concept of bendable mirrors, X-ray adaptive mirrors which are based on the adaptive optics technology and the properties of piezoelectric bimorph systems. X-ray adaptive mirrors exhibit many advantages over the classical bendable mirrors, such as mechanics-free, figure local corrections, and good focusing properties. The piezoelectric bimorph mirrors have been used in astronomy to correct the wavefront distortions introduced by atmospheric turbulence in real time. The piezoelectric bimorph mirror was first introduced into the field of synchrotron radiation by European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in the 1990s for making an X-ray reflective mirror. Compared with astronomy community, synchrotron radiation community is not interested in high-speed wavefront correction, but looking for the ultimate precision of the surface shape of piezoelectric bimorph mirror.

In the second part of this paper, the usual structure and working principle are briefly described. Piezoelectric bimorph mirrors are laminated structures consisting of two strips of an active material such as zirconate lead titanate (PZT) and two faceplates of a reflecting material such as silicon. A discrete or continuous control electrode is located between the interfaces of PZT-PZT, while two continuous ground electrodes are located between the interfaces of Si-PZT. The PZTs that are polarized normally to their surface, any voltage applied across the bimorph results in a different change of the lateral dimensions of two PZTs, thereby leading to a bending of the whole structure. The relationship between the curvature of the bending mirror and voltage is given.

In the third part of this paper, the technical issues as well as the design concepts are discussed in detail. Several Si-PZT-PZT-Si bimorph mirrors are first fabricated and tested by ESRF. The dimensions of each of them are 150 mm in length, 40–45 mm in width, and 15–18 mm in thickness. PZT is selected as an active material because of its high coupling factor, high piezoelectric coefficient, and high Curie temperature. The faceplates need to be easy to polish

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11005123).

† Corresponding author. E-mail: lim@ihep.ac.cn

such as silicon and silica. Owing to the symmetrical layered structure Si-PZT-PZT-Si, the mirror is less sensitive to temperature variations from the process of bonding and polishing. The bimorph mirrors are confirmed to be promising by experimental tests. As the state-of-art polishing technique, elastic emission machining (EEM) becomes available commercially, and diamond light source brings EEM into the bimorph mirror to achieve a novel adaptive X-ray mirror coupling adaptive zonal control with a super-smooth surface. This super-polished adaptive mirror becomes the first optics with a bendable ellipse with sub-nanometer figure error. Spring-8 fabricates an adaptive mirror with different structures, and two strips of PZTs are glued to the side faces of the mirror. This mirror shows a diffraction-limited performance.

Finally, the wavefront measuring methods and control algorithm are introduced. Wavefront measuring devices used in the metrology cleanroom include long trace profiler, nanometer optics component measuring machine, and interferometer. At-wavelength measuring methods used on the beamline include pencil-beam method, phase retrieval method, X-ray speckle tracking technique, and Hartmann test. The wavefront control algorithm is aimed at obtaining the voltages applied according to the inverse of the interaction matrix.

Keywords: synchrotron radiation, adaptive, piezoelectric bimorph mirror, X-ray

PACS: 07.60.-j, 07.85.Qe, 07.85.Fv, 41.50.+h

DOI: [10.7498/aps.65.010702](https://doi.org/10.7498/aps.65.010702)