

文章编号 2095-1531(2017)06-0699-09

双压电片镜在同步辐射光源光学系统中的应用

金利民, 罗红心, 王 劼, 王纳秀, 徐中民*

(中国科学院 上海应用物理研究所 张江园区, 上海 201204)

摘要:介绍了双压电片镜自适应光学技术,同时为其在同步辐射光学领域中的应用与进一步发展提供前瞻性的思考与探索。根据目前已公开发表的相关文献资料,总结介绍了双压电片镜自适应光学技术,阐述了该技术的工作机理与关键参数,并对其在国际上具有代表性的同步辐射机构中的应用情况作出描述,并指出涉及的关键技术问题与未来的发展趋势:不仅要有效地解决“连接点效应”对双压电片镜技术的负面影响,还要实现亚微米乃至纳米级的聚焦光斑,这两项内容都是双压电片镜技术需要进一步解决的重要问题。未来,双压电片镜自适应光学技术可望在我国先进的第三代同步辐射装置—“上海光源(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)”二期工程建设中得到应用。

关键词:自适应光学;双压电;面形精度;同步辐射

中图分类号:O434 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20171006.0699

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

JIN Li-min, LUO Hong-xin, WANG Jie, WANG Na-xiu, XU Zhong-min*

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences,
Zhangjiang Campus, Shanghai 201204, China)

* Corresponding author, E-mail: xuzhongmin@sinap.ac.cn

Abstract: In this paper, the adaptive optics technology of bimorph mirror (BM) is introduced, and its application and further development in the field of synchrotron radiation are prospected. Based on the existing published literatures, this paper summarizes the adaptive optics technology of the BM, introduces the working mechanism and key parameters of the technology, and describes its application in internationally representative synchrotron radiation units, and points out the key technical issues involved and future trends. It is found that not only to solve the negative effect of so-called “junction effect” on the technology of BM, but also to produce sub-micrometer and even nanometer sized focal spots, both are the critical issues for the future development of the proposed BM technique. This adaptive optics technique is expected to be used in the phase II construction of the advanced third generation synchrotron radiation light source in China, i. e., Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF).

Key words: adaptive optics; bimorph; slope error; synchrotron radiation

收稿日期:2017-06-11;修订日期:2017-08-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11175243)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 11175243)

1 引言

目前,具有高亮度、高准直性等诸多优势性能的第三代同步辐射光源,已被广泛应用于物理、化学、生物、医药、考古以及环保等诸多学科领域,为从事相关科研工作的人员提供了先进的科研利器,同时带来了极大的方便,已经显示出广阔的应用前景^[1-2]。同步辐射光源光束线高质量、长时间稳定运行在应用中尤为重要,是光束线上科研人员重点关注的焦点。作为影响同步辐射光源高质量稳定运行的重要因素,光学系统在其中起着十分重要的作用。而作为光学系统中的主要元件,各种光学元件(偏转镜、聚焦镜、准直镜等)的表面面形和形貌质量将会直接影响光束品质,进而影响整条光束线的光学性能,因此,该类光学元件的良好工作状态对于光束线的高效、稳定运行起到十分重要的作用^[3-4]。

在长时间的使用过程中,由于重力作用、机械装置的夹持作用或由高能同步辐射光束带入的热效应,不可避免地导致光学元件的镜面发生微小变形,镜面的面形质量变差,从而影响光束线的送光质量以及高效运行^[5-8]。为此,常需对光束线进行停光操作,以便进行光学元件的离线调试或更换。这种常规做法耗时较长,操作也不方便,影响整条光束线正常运行,这种做法也成为束线工作人员迫切希望解决的情况。此外,在某些具有特定实验需求的同步辐射光束线站上,需要所形成的聚焦光斑的焦距与尺寸具有连续可变化的一系列功能。鉴于此,迫切需要一种可在线进行镜面面形质量调试的方法。正是在此需求下,自适应光学技术应运而生,此技术可以对各种光学镜面进行实时的在线调试,使光学元件保持高质量的面形,且不影响光束线正常使用^[9]。

双压电片变形镜(Bimorph Mirror, BM)作为一种典型自适应光学技术,在同步辐射光源的应用得到了显著的发展。BM 含有若干(8~32个)嵌入式压电片,其通过将适当的电压施加到压电片上,可在法向上使镜面弯曲而形成所要求的面形。此外,BM 还具有较多的自由度,可精细补偿

或纠正由上述的各类负面效应导致的面形误差,从而保证面形精度^[9-12]。因此,在世界范围内 BM 的各同步辐射光源得到了较为广泛的发展与应用。其中,代表性的机构如:ESRF(European Synchrotron Radiation Facility, 法国)、SPring-8(日本)、DLS(Diamond Light Source, 英国)等^[12-21]。

本文详细介绍了 BM, 阐明该光学系统的工作机理与关键参数,并针对其在国际上具有代表性的同步辐射光源机构的应用情况作出概述,指出关键技术问题与未来发展趋势。同时,为该类自适应光学系统在我国同步辐射装置,特别是在第三代同步辐射装置 SSRF(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, 上海光源)自适应光学系统上的应用提供前瞻与有益的探索。

2 BM 的工作机理与关键参数

2.1 工作机理

1880年,法国科学家居里兄弟发现石英晶体在受到压力时,表面上会产生电荷,且电荷量与压力成正比,他们称这种现象为“压电效应”,即在一定外力条件下实现机械能与电能的相互转化。某些压电材料在受到外力作用而变形时,因其内部产生极化而在其两个相对表面上出现正负相反的等量电荷的现象称为“正压电效应”。当在压电材料的极化方向上施加电场致其发生相应变形的现象则被称为“逆压电效应”^[22]。

典型的 BM 结构是将两片压电材料(如锆钛酸铅压电陶瓷材料, Lead Zirconate Titanate Piezoelectric Ceramic, PZT)的薄片按相反的极化方向粘接而成,如图 1 所示,由 J. Susini 建立的 BM 典型

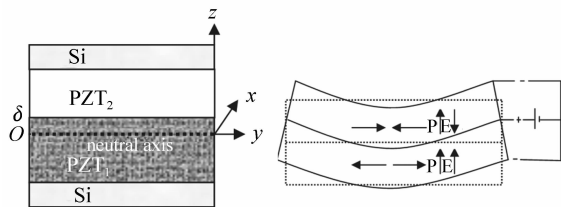


图 1 BM 结构示意图^[12]

Fig. 1 Schematic diagram of BM^[12]

单元的截面结构,其由两层压电陶瓷板(PZT₁和PZT₂)及上、下两晶片组成,每两层之间(即“Si-PZT”、“PZT-PZT”及“PZT-Si”)镀金属膜作为电极以提供电压。根据压电材料的“逆压电效应”,在其极化方向上施加一定的电压后,引起材料沿垂直于极化方向伸展或收缩,则其中的一个PZT膨胀,另一个PZT则收缩,从而带动上、下两个晶片发生弯曲。如果两片压电材料的伸缩量不一致就会导致结构的弯曲变形。这样,通过动态控制电压大小、电极数目和施以特定的边界条件即可实现对BM镜面面形的实时控制,从而使BM的镜面在重力作用、机械式装置的夹持作用或高能光束的热效应等影响镜面面形精度的各种工况条件下,仍然能够保持较高的面形精度以满足高标准、高效率的实验需求^[2,12]。

$$\alpha = \frac{3t^2}{2} \cdot \frac{\left(\frac{t_1}{n_1+1} - \delta\right) + \left(\frac{E_2 d_{31-2}}{E_2 d_{31-1}}\right) \left(\frac{t_2}{n_2+1} + \delta\right)}{\left(t_1 - \delta\right)^3 + \frac{E_{si}}{E_1} \left[\left(t_1 - \delta + t_{si}\right)^3 - \left(t_1 - \delta\right)^3 \right]}, \quad (4)$$

式中, α 是常数,取决于BM的形状与材料属性。 d_{31-1} 和 d_{31-2} 、 E_1 和 E_2 、 t_1 和 t_2 分别是两陶瓷板的压电常数,弹性模量以及厚度。 E_{si} 、 t_{si} 分别是上下晶片的弹性模量与厚度。 t 为单元总厚度。 δ 是中轴 y 到“PZT-PZT”界面的距离。当给定BM后,其机械与压电作用则由系数 n_1 与 n_2 来表示, n_1 与 n_2 可由有限元分析软件计算得到。

式(2)表明BM镜面的弯曲半径主要取决于3个参数,即 t 、 V_0 及 d_{31-1} 。若电极长度 L_e 或宽度 W_e 小于镜子的实际长度 L 或宽度 W ,此时式(2)必须考虑修正因素,即:

$$R_m = \frac{t^2}{\alpha d_{31-1} V_0} \cdot \frac{W}{W_e}, \quad (5)$$

$$R_s = \frac{t^2}{\alpha d_{31-1} V_0} \cdot \frac{L}{L_e}. \quad (6)$$

3 BM在代表性同步辐射光源中的应用

3.1 代表性机构

鉴于第三代同步辐射光源的各高精密光学镜

2.2 关键参数^[2,12]

对于“Si-PZT-PZT-Si”型BM,其变形规律取决于材料的性能与结构几何特征。在“PZT-PZT”的界面上施加电压 V_0 之后,BM镜面发生相应的弯曲变形,此时镜面上任一点 (x,y) 在法向上的位移量 U_z 以及此刻相对应的镜面子午弯曲半径 R_m 或弧矢弯曲半径 R_s 分别为:

$$U_z = \alpha \frac{d_{31-1} V_0}{2t^2} (x^2 + y^2), \quad (1)$$

$$R_m = R_s = \frac{t^2}{\alpha d_{31-1} V_0}, \quad (2)$$

其中,

$$t = t_1 + t_2 + 2t_{si}, \quad (3)$$

面系统的工作现况,即各类光学元件的镜面在各种工况的影响下势必会发生微小的变形,从而使镜面的面形精度变差,进而影响各条相关同步辐射光束线的正常、稳定以及高效运行。在世界范围的同步辐射领域内,此情况激发了对可实时在线调节与补偿的自适应光学机构的需求,从而增强了BM的研发与应用。近30年来,在国际上已有一些同步辐射机构使用BM来在线调节各光学元件的面形精度,用于提高光束线运行的效率与质量,都起到了比较显著的积极效果。在这些同步辐射机构中,具有代表性的主要有:欧洲的ESRF、日本的SPRING-8以及英国的DLS等。

3.2 ESRF

早在20世纪的90年代,ESRF的科研人员就已认识到BM的性能优势,开始积极发展相关的BM技术。如图2所示,安装于ESRF的ID26光束线上的BM,长度为750 mm,其主要功能是用于水平面上波荡器光源的切向聚焦^[16]。此外,对于具有6个电极的BM,在镜面的弯曲半径达到100 m的情况下,面形误差的RMS值可达到2 μ rad以下。此外,可以通过设计不同厚度的BM

来实现较小的弯曲半径,如可通过 1 cm 厚度的 BM 达到 30 m 的弯曲半径^[12-14]。此后,因其显著的性能优势,BM 在同步辐射领域中得到了大力推广,在世界各国的同步辐射机构中如雨后春笋般地发展起来。

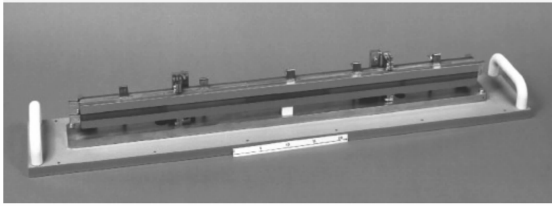


图 2 安装于 ESRF 用于水平面上波荡器光源切向聚焦的 BM^[16]

Fig. 2 BM which was used to tangentially focus the undulator source in the horizontal plane at ESRF^[16]

3.3 SPring-8

21 世纪初,SPring-8 对 BM 的性能进行了一系列的研究,并在其同步辐射光束线站上开始使用 BM。如图 3 所示,被安装于特制的机械夹持机构内,光学反射面(材料为裸熔融的二氧化硅)的长度为 295 mm,宽度为 45 mm 的 BM^[15]。经过科研人员的不懈努力,设计的 BM 可以完全覆盖“270 m 凹面至 1 475 m 凸面”之间的球面弯曲半径。此外,镜面的面形误差与高度误差这两项主要指标都得到了较为显著的降低,两者的 RMS 值可分别达到 1 μrad 和 12 nm。线站工作人员还可以进一步地自定义控制光学反射面的形状^[15-16]。如今,经过了十多年的技术与完善,BM 的性能进一步提升,可设计的 BM 的长度也越来越大。在目前的技术条件下,BM 的长度可达到 1 m 以上。通过 BM 可得到具有一系列的切向弯曲半径与椭圆形面形的光学镜面,完全可以用来满足特定的可变焦距和可变光斑尺寸的实验需求,显著提高了光束线的光学性能。

3.4 DLS

在 DLS 的多条 X 射线光束线上(如 I02 和 I03 光束线),皆使用了由法国制造商 Thales-Seso 所设计制造的 BM 来聚焦和准直光束。BM 的镜面抛光质量可达到面形误差 RMS 值约为

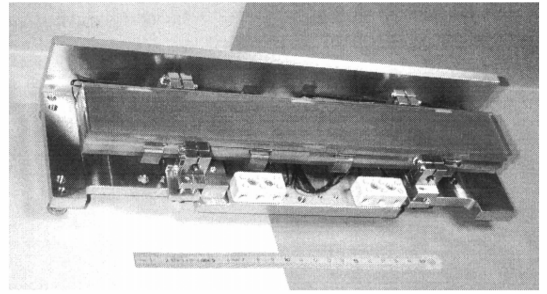


图 3 在 SPring-8 中安装于机械夹持机构内的 BM^[15]

Fig. 3 BM which was installed in its mechanical holder at SPring-8^[15]

0.5 μrad 至 1 μrad ,粗糙度的 RMS 值约为 3 Å 以下,且镜面的表面常被涂上重金属层,以提高所需带宽的 X 光反射率^[17-21]。图 4 为用于 DLS 生物大分子晶体学光束线站上的 BM,其长度为 1 050 mm,具有 14 个压电片与水平聚焦功能^[17]。

值得指出的是:任何事物在具有积极一方面的同时,也都具有消极的一面。对于 BM 这项相对“年轻”的技术而言,也不例外。在 BM 的长期服役期内,DLS 的研究人员们发现了涉及其性能稳定性与光束线品质的几点问题,如下文将会提到的电压变化后镜面曲率的动态漂移问题以及光斑的异常问题^[17,20]。通过深入查找问题并细心实验与分析,研究人员们找到了问题所在,并根据成因分析,制定了科学有效的解决方案,取得了完美的效果。

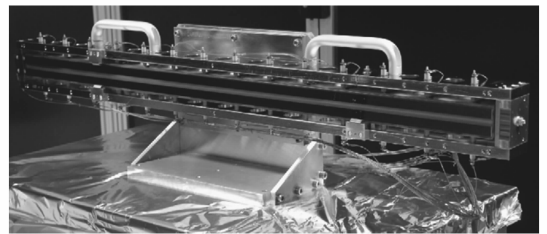


图 4 1 050 mm 长,水平聚焦 BM^[17]

Fig. 4 A 1 050 mm long, horizontally focusing BM^[17]

3.5 BM 的应用与发展概述

通过以上的叙述可以发现:经过近 30 年的应用与发展,BM 技术已日趋成熟,且发展迅速,显示出优异的性能优势与可操作性。该项自适应光

学技术已在世界范围内的同步辐射光源机构中得到应用并不断发展与进步,显示出了广阔的应用前景。

目前,在我国典型的第三代同步辐射装置—上海光源一期工程各相关光束线的光学系统中,尚未使用此项自适应光学技术。随着上海光源二期工程建设任务的稳步与有序推进,鉴于 BM 的性能优势与技术性要求,需要研究人员根据有关光束线站的物理设计指标与科学需求,在各项工程条件充分可行的情况下,深入研究并发展 BM 技术,以进一步提高各条光束线的光学性能、运行稳定性以及工作效率。

4 关键技术问题

当前,虽然 BM 已经在世界范围内的各同步辐射装置中得到较为广泛的应用,但在长期工作的实际工况中,仍然会发现其存在着一些影响其性能的关键技术问题,需要在未来的使用中加以注意并不断改进。这些关键技术问题主要包括:

(1) 系统自由度较多,操作较复杂^[23]。

从机械结构上来看,BM 具有较多的自由度,故在操作上较为复杂与耗时,尤其是对于缺乏相关操作经验的科研人员。为尽量避免或解决此问题,可通过设计与开发更为高效和用户友好的操作软件,以达到所施加电压的变化与镜面变形和检测系统的实时同步,从而提高整个系统的自动化程度与精度水平。

(2) 电压变化后镜面曲率的动态漂移问题^[17]。

当施加一个新的电压后,研究人员发现 BM 的切向曲率在一段较长的时间(几小时或几天)内会随着时间的延续发生一定的“漂移”现象。图 5 显示了在施加 100 V 的电压之后,BM 的弯曲半径在 3 天内的变化过程。从图 5 中发现:镜面的弯曲半径值在经过初始 20 min 的急剧上升之后,开始下降,约在 1 天内逐渐降低到一个稳定的值。对于此现象,可能的原因主要包括:电压不稳定;约束光学器件的夹具和安装件;以及压电陶瓷或胶类介质的“松弛”效应。在实际工程操作过程中,且在时间充足的情况下,为了得到精确且稳

定的结果,建议在电压改变之后再等待半小时左右,即待系统达到稳定状态后再进行下一步的操作。

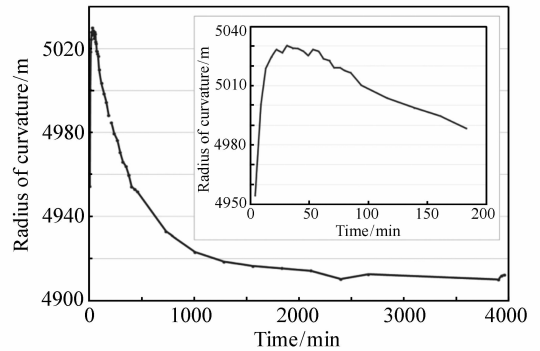


图 5 600 mm BM 在施加 100 V 电压后弯曲半径的变化过程^[17]

Fig. 5 A 600 mm BM as a function of time after applying a voltage change of 100 V^[17]

(3) 光斑异常问题^[17, 20]。

DLS 内一些使用 BM 的光束线不能获得具有理想尺寸的 X 射线聚焦光斑,且在反射光线上发现了明显异常的光斑区域,即反射光束会发生异常增宽与扭曲的现象。为了探讨与解决此问题,以充分发挥 BM 的应用潜力,DLS 开展了一系列较为深入的研究。通过研究,在 BM 的镜面上发现若干个宽度达数个毫米,波峰与波谷间约为 20 μrad 的波浪状的“疵点”,如图 6 所示“疵点”发生的部位几乎皆处于相邻压电陶瓷片之间的光学镜面区域上,故科研人员将此现象称为“连接点效应”,且在多块具有不同数目的压电片、不同

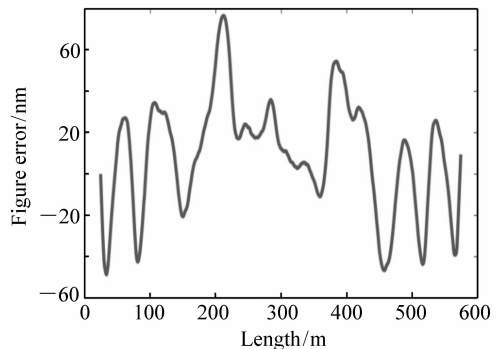


图 6 BM 镜面的波纹状起伏^[20]

Fig. 6 Corrugation of the optical surface on a BM^[20]

长度和厚度的 BM 上皆发现了该现象。正是这种相邻界面连接点处的镜面“疵点”导致经由镜面反射的光束上产生异常现象。究其原因,研究人员认为是由于粘接压电陶瓷片与光学基座的胶质材料在 BM 的制作、搬运、安装上线以及使用的过程中,自然老化、超高真空、同步辐射等因素导致其性能发生了一定的破坏,从而使 BM 镜面出现微小的扭曲形变。

为避免这种负面效应,恢复镜面表面质量。DLS 将 BM 返回制造商法国 Thales-SESO 公司进行再次抛光。如图 7 和图 8 所示,对再次抛光之后的镜面进行测试后发现:镜面的面形精度的 RMS 值由抛光之前的约 $3.5 \mu\text{rad}$ 优化为约 $0.4 \mu\text{rad}$,提高了近一个量级,且聚焦光斑也非常接近于由“光束追迹”方法预测的理论尺寸,即再

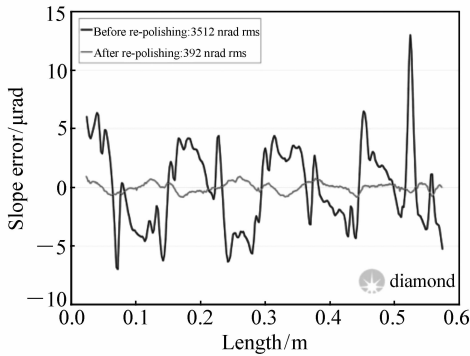


图 7 BM 再次抛光前后的镜面面形误差曲线^[17]

Fig. 7 Slope error of the BM before and after re-polishing^[17]

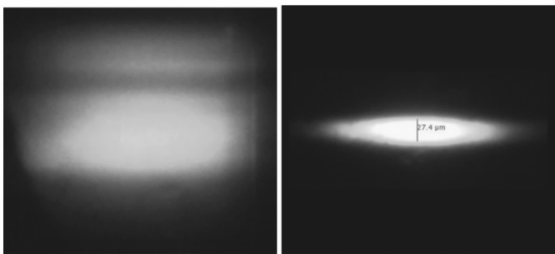


图 8 BM 再次抛光前(左)后(右)的 X 射线聚焦结果(DLS 的 I03 光束线)^[17]

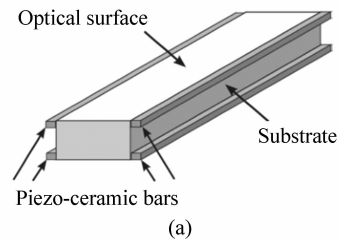
Fig. 8 Images of the focused X-ray beam at DLS I03 beamline, before(left) and after(right) re-polishing of BM^[17]

次抛光工艺可以显著提高镜面质量与光束线性。鉴于再次抛光工艺并未影响压电陶瓷片之间的连接部位,且在之后光束线运行的一年多时间内,通过 X 光扫描抛光后的镜面并未发现任何变化,因此可推断“连接点效应”将不再出现,上述负面效应已被消除。

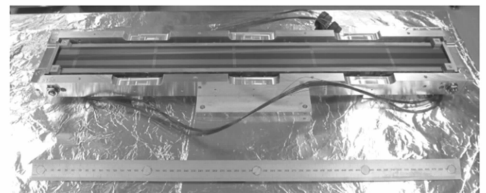
5 未来发展趋势

作为一种自适应光学元件,BM 能够在线调整镜面面形,提高了同步辐射光束线的运行质量与效率,应用前景非常广阔。未来,为了充分发挥 BM 的性能优势,需要根据同步辐射光束线的实际工程情况,不断优化其结构与性能,以更好地发挥其优势。对于未来 BM 的发展趋势,应主要关注于以下方面:

(1) 目前所广泛采用 BM 的压电陶瓷片都是安装在光学镜面的下方,这种结构会导致上文所述的“连接点效应”,不仅不利于高质量镜面的形成与光束线的高效运行,而且由此导致的“再次抛光”修复工艺耗时耗力,修复成本也较高,并不能从根本上解决问题。为了避免这一现象且达到



(a)



(b)

图 9 新一代 BM (a) Thales-SESO 示意图; (b) DLS 实物图^[20]

Fig. 9 Next-generation BM. (a) Thales-SESO schematic diagram and (b) DLS real view^[20]

“治本”的效果,如图 9 所示,可考虑将压电陶瓷片安装在镜面的侧面,使得相邻的压电陶瓷片间

无直接接触,消除因接触所导致的镜面局部微小扭曲,保证镜面的面形精度,以确保同步辐射光束线在较长时间内的高效与高品质运行^[20]。当前,此技术仍处于前期研究阶段,需要大量合理的实验数据以验证粘胶、压电陶瓷片与镜子三者结合的稳定性与性能,防止因蠕变等力学问题动态影响镜面的面形精度。

(2)目前,对于同步辐射光源装置和 X 射线自由电子激光装置光束线,所广泛关注的大多为微米级与亚微米级聚焦。随着技术的进步,纳米级和亚纳米级聚焦将日益成为主流。鉴于此,研究人员将 BM 自适应技术和新颖的“弹性发射加工”(Elastic Emission Machining, EEM)抛光技术相结合,可设计一种新型 BM。这种 BM 可在亚纳米级层次内提供可变焦距以及局部面形控制,且这种光学系统还具有产生无扭曲光束的潜力^[24]。

6 结束语

(1)作为一种自适应光学技术,BM 是根据压电材料的“逆压电效应”设计制造而成。通过动态控制电压大小、电极数目和施以特定的边界条件即可实现对 BM 镜面面形的实时控制,从而可

使 BM 的镜面在重力作用、机械式装置的夹持作用或高能光束的热效应等影响镜面面形精度的各种工况条件下,仍然能够保持较高的面形精度以满足高标准、高效率的实验需求。

(2)BM 的变形规律取决于组成材料的性能与结构几何特征。BM 镜面的弯曲半径主要取决于 3 个参数,即 t 、 V_0 及 d_{31-1} 。

(3)经过近 20 余年的发展,BM 技术已日趋成熟、发展迅速,已在世界范围内的同步辐射光源机构中得到应用,显示出广阔的应用前景。在我国典型的第三代同步辐射装置—上海光源的二期工程中,在各项工程条件充分可行的情况下,建议考虑采用与发展此项技术。

(4)BM 的关键技术问题主要包括:系统自由度较多,操作较复杂;电压变化后镜面曲率的动态漂移问题以及光斑异常问题。

(5)对于未来 BM 的发展趋势,一是考虑将压电陶瓷片安装在镜面的侧面,使得相邻的压电陶瓷片间无直接接触,消除因接触所导致的镜面局部微小扭曲,保证镜面的面形精度;二是将 BM 自适应技术和新颖的“弹性发射加工”抛光技术相结合,可设计一种可在亚纳米级层次内提供可变焦距以及局部面形控制的新型 BM。

参考文献:

- [1] 麦振洪. 同步辐射光源及其应用[M]. 北京:科学出版社,2013.
MAI ZH H. *Synchrotron Radiation Light Source and Its Application*[M]. Beijing:Science Press,2013. (in Chinese)
- [2] 徐朝银. 同步辐射光学与工程[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2013:43-53.
XU CH Y. *Optics and Engineering of Synchrotron Radiation*[M]. Hefei:University of Science and Technology of China Press,2013:43-53. (in Chinese)
- [3] 罗红心,王劼,肖体乔. 同步辐射用光学元件的检测[J]. 中国激光,2009,36(s2):134-139.
LUO H X,WANG J,XIAO T Q. Optical elements metrology in synchrotron radiation[J]. *Chinese J. Lasers*,2009,36(s2):134-139. (in Chinese)
- [4] 林维豪,罗红心,宋丽,等. 同步辐射用光学元件面形绝对检测方法的研究[J]. 光学学报,2012,32(9):0912005-1.
LIN W H,LUO H X,SONG L,*et al.*. Absolute flatness measurement of optical elements in synchrotron radiation[J]. *Acta Optica Sinica*,2012,32(9):0912005-1. (in Chinese)
- [5] 曲艳峰,吕丽军. 同步辐射仪器中柔性铰链压弯机的研究[J]. 光学精密工程,2002,10(2):220-225.
QU Y F,LV L J. Research on the flexural hinge-based bender in a synchrotron radiation instrument[J]. *Opt. Precision Eng.*,2002,10(2):220-225. (in Chinese)
- [6] 黄志刚,董晓浩,高飞,等. X 射线衍射和散射光束线环面聚焦镜的面形精度与像差分析[J]. 光学精密工程,2004,12(1):26-30.

- HUANG ZH G, DONG X H, GAO F, *et al.*. Slope error and aberration analysis for XRD beamline toroidal focusing mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1):26-30. (in Chinese)
- [7] 孙福权, 傅远, 祝万钱, 等. 压弯镜系统自重平衡多点调节方法的研究[J]. *核技术*, 2011, 34(4):246-250.
- SUN F Q, FU Y, ZHU W Q, *et al.*. A study on multi-point gravity compensation of mirror bending system [J]. *Nuclear Techniques*, 2011, 34(4):246-250. (in Chinese)
- [8] 卢启鹏, 高飒飒, 彭忠琦. 同步辐射水平偏转压弯镜面形误差分析与补偿[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11):2644-2650.
- LU Q P, GAO S S, PENG ZH Q. Analysis and compensation of slope error for synchrotron radiation horizontal deflected mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11):2644-2650. (in Chinese)
- [9] KOKOROWSKI S A. Analysis of adaptive optical elements made from piezoelectric bimorphs [J]. *J. Optical Society of America*, 1979, 69(1):181-187.
- [10] LIPSON S G, RIBAK E N, SCHWARTZ C. Bimorph deformable mirror design [C]. *Proceedings of SPIE, Adaptive Optics in Astronomy*, 1994, 2201:703-714.
- [11] SCHWARTZ C, RIBAK E, LIPSON S G. Bimorph adaptive mirrors and curvature sensing [J]. *J. Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision*, 1994, 11(2):895-902.
- [12] SUSINI J, LABERGERIE D, ZHANG L. Compact active/adaptive X-ray mirror-bimorph piezoelectric flexible mirror [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(2):2229-2231.
- [13] SIGNORATO R, HIGNETTE O, GOULON J. Multi-segmented piezoelectric mirrors as active/adaptive optics components [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 1998, 5:797-800.
- [14] SIGNORATO R, SOLE V A, GAUTHIER C. Performance of the ESRF ID26 beamline reflective optics [J]. *J. Synchrotron Radiation*, 1999, 6:176-178.
- [15] SIGNORATO R, CARRÉ J F, ISHIKAWA T. Performance of the SPring-8 modular piezoelectric bimorph mirror prototype [C]. *Proceedings of SPIE, X-ray Mirrors, Crystals and Multilayers*, 2001, 4501:76-87.
- [16] SIGNORATO R, ISHIKAWA T. R&D on third generation multi-segmented piezoelectric bimorph mirror substrates at SPring-8 [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 2001, 467:271-274.
- [17] 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 A*, 2013, 710:87-92.
- [18] SAWHNEY K, ALCOCK S, SUTTER J, *et al.*. Characterisation of a novel super-polished bimorph mirror [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, 425:052026.
- [19] WANG H C, SAWHNEY K, BERUJON S, *et al.*. Fast optimization of a bimorph mirror using X-ray grating interferometry [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8):2518-2521.
- [20] ALCOCK S G, NISTEA I, SUTTER J P, *et al.*. Characterization of a next-generation piezo bimorph X-ray mirror for synchrotron beamlines [J]. *J. Synchrotron Radiation*, 2015, 22:10-15.
- [21] SUTTER J P, ALCOCK S G, KASHYAP Y, *et al.*. Creating flat-top X-ray beams by applying surface profiles of alternating curvature to deformable piezo bimorph mirrors [J]. *J. Synchrotron Radiation*, 2016, 23:1333-1347.
- [22] 阎瑾瑜. 压电效应及其在材料方面的应用 [J]. *数字技术与应用*, 2011, 1:100-101.
- YAN J Y. Piezoelectric effect and its application in materials [J]. *Digital Technology & Application*, 2011, 1:100-101. (in Chinese)
- [23] SUTTER J P, ALCOCK S G, SAWHNEY K J S. Automated in-situ optimization of bimorph mirrors at diamond light source [C]. *Proceedings of SPIE, Advances in X-Ray/Euv Optics and Components VI*, 2011, 8139:813906.
- [24] SAWHNEY K J S, ALCOCK S G, SIGNORATO R. A novel adaptive bimorph focusing mirror and wavefront corrector with sub-nanometre dynamical figure control [C]. *Proceedings of SPIE, Adaptive X-ray Optics*, 2010, 7803:780303.

作者简介:



金利民(1984—),男,江苏盐城人,博士,助理研究员,2009年、2012年分别于东华大学获得硕士、博士学位,主要从事同步辐射光学与技术方面的研究。E-mail: lmjin@sinap.ac.cn



徐中民(1977—),男,河南鲁山人,博士,研究员,2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事同步辐射光束线技术方面的研究。E-mail: xuzhongmin@sinap.ac.cn

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊,A4开本;刊号:ISSN 2095-1531/CN 22-1400/04;国内外公开发行人,邮发代号:国内12-140,国外BM6782。

- | | |
|-----------------|----------------|
| ★ 荷兰 Scopus 数据库 | ★ 中国精品科技期刊 |
| ★ 美国《乌利希国际期刊指南》 | ★ 中国科技核心期刊 |
| ★ 美国《化学文献》 | ★ 中国光学学会会刊 |
| ★ 波兰《哥白尼索引》 | ★ 中国科技论文与引文数据库 |
| ★ 俄罗斯《文摘杂志》 | ★ 中国期刊全文数据库 |
| | ★ 万方数字化期刊全文数据库 |
| | ★ 中国科技期刊数据库 |
| | ★ 中国光学期刊网数据库 |

主要栏目:微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

发稿类型:学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

协办单位:激光与物质相互作用国家重点实验室

编辑出版:《中国光学》编辑部

投稿网址: <http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址: chineseoptics@ciomp.ac.cn; zgxcn@126.com

联系电话:0431-86176852; 0431-84627061 传 真:0431-84627061

编辑部地址:长春市东南湖大路3888号(130033)