

## 上海光源硬 X 射线光束在线监测

胡哲<sup>1,2,3</sup>, 洪春霞<sup>2\*\*</sup>, 滑文强<sup>2\*</sup>, 王玉柱<sup>2</sup>, 李秀宏<sup>2</sup>, 王劼<sup>1,2</sup><sup>1</sup>中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;<sup>2</sup>中国科学院上海高等研究院上海光源, 上海 201204;<sup>3</sup>中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

**摘要** 设计了一种基于荧光成像的 X 射线光束在线监测装置, 用于上海光源硬 X 射线光束的实时在线监测。相较于现有位置监测器和气体电离室, 该装置能实现 2 kHz 高速采集, 具有实时监测光束位置、通量、尺寸以及重建入射光波前相对变化量的功能, 且不会影响下游实验开展。该装置可用于光学器件和实验位置反馈, 在超长和微纳聚焦光束线站将有很好的应用。在上海光源时间分辨超小角散射线站的 USAXS 和微聚焦 SAXS 实验站利用该装置开展在线监测实验, 采集并分析了常用实验帧率下的光束稳定性数据, 得到了该线站光束位置、通量、尺寸分布的时频域信号和入射波前的相对变化情况, 验证了该装置的可行性。

**关键词** X 射线光学; 光束监测; 同步辐射

中图分类号 O434.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1534001

## Online Monitoring of Hard X-Ray Beam at SSRF

Hu Zhe<sup>1,2,3</sup>, Hong Chunxia<sup>2\*\*</sup>, Hua Wenqiang<sup>2\*</sup>, Wang Yuzhu<sup>2</sup>, Li Xiuhong<sup>2</sup>, Wang Jie<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;<sup>2</sup>Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China;<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Science, College of Material Science and Opto • Electronic Technology, Beijing 100049, China

**Abstract** An online monitoring device is designed for the real-time monitoring of hard X-ray beams at Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF). Compared with the existing beam position monitors and gas ionization chambers, it can monitor the beam position, size, and flux, and reconstruct the relative phase variation of the incident wavefront with an acquisition speed of 2 kHz, without affecting the downstream experiments. In addition, it has potential applicability for feedbacks of the optical devices and experimental positions in super-long and micro-nano-focused beamline stations. Experiments are carried out in the USAXS and micro-focusing SAXS experimental stations at SSRF, and beam stability data are collected at common experimental frame rates. The time-frequency domain signals of position, flux, and size distribution of the incident beam are analyzed, and the phase variation of the incident wavefront is obtained as well. Finally, the feasibility of this device is verified.

**Key words** X-ray optics; beam monitoring; synchrotron radiation

**OCIS codes** 340.6720; 340.7440

收稿日期: 2021-01-26; 修回日期: 2021-02-16; 录用日期: 2021-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(11675253, 11505278)

通信作者: \*huawenqiang@zjlab.org.cn; \*\*hongchunxia@zjlab.org.cn

## 1 引言

相比可见光和电子, X 射线具有波长短、穿透能力强等特点, 是进行无损、高分辨成像的理想光源。第三代同步辐射装置是当今国际主流的先进大科学装置, 提供宽频谱、高亮度、高准直和高相干性的 X 射线光束, 为物理、化学、生命和材料等领域的众多科学问题量身定制了多种实验方法, 有力推动了科学的快速发展<sup>[1-2]</sup>。同步辐射光束线站通常能够将 X 射线光束聚焦至微米甚至纳米量级, 而光束线长度通常在几十米甚至超过百米, 因此相应水平的光束性质稳定性对许多高精度实验来说是至关重要的<sup>[3-5]</sup>。例如上海光源时间分辨超小角散射 (USAXS) 和纳米探针光束线站均要求在毫秒级实验数据采集和小时级样品动态位置扫描过程中保持微米乃至纳米尺度的 X 射线光斑位置不变和强度恒定。这对同步辐射储存环和光束线站中的光学器件稳定性提出了非常苛刻的要求<sup>[6]</sup>, 同时还需要快速 ( $>1$  kHz 带宽) 诊断设备准确监测瞬时光束性质变化, 进而指导束线光学器件做出反馈操作<sup>[7]</sup>。

光束监测器几乎是跟同步辐射一起发明的, 光束性质主要关注光谱分布、光通量、光强分布、发散度、相干性和光波前等关键参数<sup>[8-12]</sup>。现有的薄膜型 X 射线光束位置监视器 (XBPM) 设备是基于插入到光束中的金属箔, 用对称分布的四个光电二极管系统检测来自金属箔的散射 X 射线和荧光 X 射线, 通过分析四象限检测电流的偏差值来解析出光斑位置变化量, 但是由于检测箔片产生 X 射线的散射角度效率低, 导致信噪比差<sup>[13]</sup>。

光电二极管四象限光束位置探测器利用硅光电二极管可以有效地检测所有被截获的光子位敏电阻, 其中硅厚度为 5 mm, 已由 Fuchs 等<sup>[14]</sup> 测试成功, 但是他们的辐射损伤和稳定性仍然是一个问题。位置敏感气体电离室在较少的 (且容易变化的) 束流衰减下可以取得良好的效率, 但与固态半导体器件相比, 由于气体中产生的光电子通常集中在几毫米范围内, 其位置响应较差, 而且吸收光束的进出窗口之间必须包含工作气体<sup>[15]</sup>, 导致入射光束被部分吸收。2007 年以来, 基于化学气相沉积生长的多晶金刚石薄片得以成功应用, 因其具有坚固的机械强度、高辐射耐受和低 X 射线吸收等良好品质。结合金刚石 (或碳化硅) 薄膜和四象限电极测量的 XBPMs

能够达到 1 kHz 的响应速度和  $<1 \mu\text{m}$  的空间分辨<sup>[16-18]</sup>。

基于荧光屏成像的光束监测器最初由 Fajardo 等<sup>[19]</sup> 提出, 并发展为 X 射线透射和非透射型等多种架构, 近年来在各大同步辐射装置中应用广泛<sup>[7, 20]</sup>。该装置结构简单, 得益于近年发展出的高荧光效率金刚石屏, 结合快速高动态范围相机系统, 通过拍摄 X 射线荧光可以采集到瞬时光强分布, 解析出瞬时光束尺寸、位置和光通量。

本文设计了一种新型的同步辐射 X 射线光束在线监测系统, 在不影响光束正常运行的情况下, 实时在线测量光束强度分布, 可用于光束线站调试工作; 通过对实时 X 射线光束图像进一步开展数据拟合和时频域分析, 能够得到 X 射线光束尺寸、位置和通量等光束线站核心参数的时域波动情况。同时结合能流法<sup>[21]</sup> 可以实时监测入射光波前的相对变化量, 不受限于光束的相干性, 在关注入射光波前稳定性的成像实验线站将会有很好的应用。

## 2 硬 X 射线在线监测装置

本文提出一种新型基于荧光成像的 X 射线光束在线监测装置, 其结构示意图如图 1 (a)、(b) 所示, 由荧光屏、中心带通光孔的可见光反射镜和变倍显微镜筒及高灵敏快速 CMOS 相机构成; 荧光屏采用硼掺杂 CVD 金刚石片 (B: CVD, Diamond Materials GmbH, 德国), 光子内能转换效率为 5.2%, 相对于 YAG 的荧光屏光子发射效率为 38%<sup>[22]</sup>; 其热导率达到  $2000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 长  $\times$  宽尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 厚度为  $30 \mu\text{m}$ , 其对能量区间为  $8 \sim 15 \text{ keV}$  的 X 射线光子透过率如表 1 所示, 在常用 X 射线能量  $10 \text{ keV}$  照射时, B: CVD 荧光屏的 X 射线光子透过率为 97.7%。如图 1 所示, 其产生的荧光图像将通过变倍显微镜筒 (Navitar12  $\times$  Zoom, 0.58  $\sim$  7 倍系统放大) 成像到快速相机 (Hamamatsu C11440-36U 高灵敏 CMOS 相机, 12 bit) 上。该套设备可以实现 65 frame/s 的全幅光束拍摄, 最快能达到 2000 frame/s 的一维光束抖动监测, 探测器单幅曝光时间在  $10 \text{ s} \sim 2.7 \mu\text{s}$  之间可调, 并支持电子增益; 通过光学变倍, 光斑探测像素尺寸在  $10 \sim 0.84 \mu\text{m}$  之间变化, 已经能够满足硬 X 射线光束线站的绝大部分应用场景。如图 1(a) 中横向箭头所示, 支持 X 射线光束双向通过, 方便装置的布局 and 安装。

表 1 30  $\mu\text{m}$  厚 B:CVD 荧光屏的光子透射率与 X 射线能量的函数关系Table 1 Photon transmittance of a 30  $\mu\text{m}$  thick B:CVD fluorescent screen as a function of the X-ray energy

Energy /keV	8	9	10	11	12	13	14	15
Photon transmittance/ %	95.5	96.9	97.7	98.3	98.7	98.9	99.1	99.3

基于荧光成像的同步辐射光束监测装置经过多年发展之后已形成多种架构,但尚不能完全实现在线精准测量。架构 1 如图 1(c)所示,将荧光屏倾斜  $45^\circ$  放置在 X 射线光路中,通过光学系统将可见光直接成像到探测器上,该设计能透射直通光束,支持 X 射线光束双向通过,不干扰下游实验,满足在线测量要求,但是其荧光屏监测面倾斜于光路,因此在监测聚焦深较短的聚焦光束时会出现测量偏差;架构 2 如图 1(d)所示,其荧光屏监测面垂直于 X 射线光路放置,产生的可见光通过  $45^\circ$  反射镜和光学系统成像

于探测器上,该设计中的可见光反射镜会遮挡直通光束,仅支持 X 射线光束单向照射,且工作时会影响下游实验,不能满足实时在线监测要求;本文基于架构 2,提出在可见光反射镜中心设置直径 2 mm 的通气孔[图 1(b)中插图],能让 X 射线光束通过,且不会影响下游实验开展,满足实时在线监测要求。该通气孔仅占约 1% 的反射镜面积,对荧光反射略有损失,但在实际使用中对成像效果无影响。基于该装置,对上海光源 USAXS 光束线站进行了束线实时在线监测。

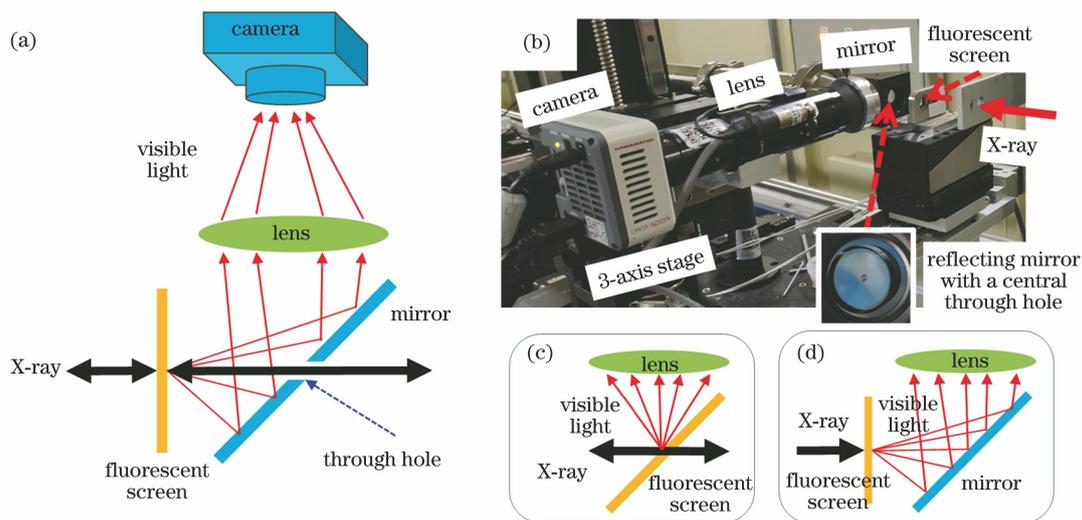


图 1 基于荧光成像的 X 射线光束在线监测装置。(a)结构示意图;(b)实物现场图;  
(c)(d)现有基于荧光成像的 X 射线光束监测装置结构示意图

Fig. 1 X-ray beam on-line monitoring device based on fluorescence imaging. (a) Structural schematic diagram; (b) physical scene map; (c)(d) existing structural schematic diagram of X-ray beam monitoring device based on fluorescence imaging

SSRF-USAXS 光束线站总长 120 m, 拥有 USAXS、微聚焦 SAXS 和工业应用三个实验站, 主要利用时间分辨超小角/小角/广角散射技术<sup>[23]</sup> 研究材料(如塑料、橡胶及其复合材料)在外场环境中内部多级结构演化过程、高分子和纤维材料工业加工过程中结构演变机理、软物质自组装及非平衡动力学过程中的结构变化等关键科学技术问题, 以及利用微聚焦 SAXS 技术研究材料局域微区结构在外场中的动态演化机制。光束线站布局如图 2 所示, 波荡器安装在低  $\beta$  直线段, 波荡器周期长度为 20 mm, 总长度为 1.6 m, 辐射出的光束经 21 m 处的白光狭缝限制光束发散角为  $60 \mu\text{rad} \times 20 \mu\text{rad}$ , 距离光源点 28 m 处放置水平偏转镜, 提供

6.4 mrad 的光束水平偏转角, 为 Canted 线站 (BL10U1 和 10U2) 争取更大的物理空间; 液氮冷却多层膜(膜层材料为 Pd/B<sub>i</sub>C, 膜周期厚度为 2.5 nm, 膜周期数为 150 层)单色器位于 34 m 处, 提供能量分辨率约 1% 的准单色光, 能量范围为 8~15 keV; 通过调节水平聚焦镜(41 m)和垂直聚焦镜(45 m)将 X 射线聚焦到距离光源点 70 m 处的 USAXS 样品点上; 在微聚焦 SAXS 工作模式下, 距离光源点 100 m 处的 KB(Kirkpatrick-Baez)聚焦镜以 70 m 处狭缝上的光斑作为次级光源, 在 101.5 m 处为样品提供小于 10  $\mu\text{m}$  的聚焦光斑。

SSRF-USAXS 实验站的样品点位于 70 m 处, 该位置同样为微聚焦 SAXS 的次级光源点, KB 镜

的聚焦点在 101.5 m 处,因此分别在 70 m 和 101.5 m 处放置光束在线监测装置(图 2),用于辅助光路调节和监测样品处的光束性质随时间的变化

情况。为了保证调光和监测光束的准确性,监测器的荧光屏位于样品前约 1~5 cm 处,不会影响样品放置和更换。

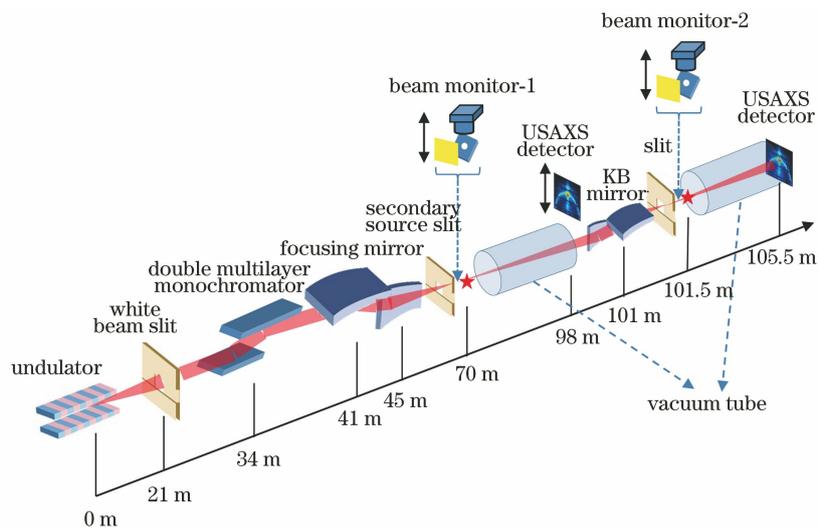


图 2 上海光源 USAXS 光束线布局图与光束在线监测装置分布

Fig. 2 Layout of SSRF-USAXS beamline and the distribution of beam on-line monitors

如图 3(a)所示,理论上反射聚焦镜能够将次级光源点发出的光线会聚到像点上,但理想的聚焦光斑取决于理想的次级光源点分布、良好的镜子面型和精准的镜子姿态;USAXS 实验站的 KB 镜配置 7 轴电动和 3 轴手动姿态调节,并有 4 轴动态压弯调

节,通过在线监测装置实时采集 X 射线光强分布,能够准确指导聚焦操作,快速达成理想聚焦效果;USAXS 光束线 70 m 次级光源点处的光强分布如图 3(b)所示,光斑尺寸约为 200  $\mu\text{m}$ ,满足聚焦要求;距离光源点 101.5 m 处,KB 镜聚焦操作前后的

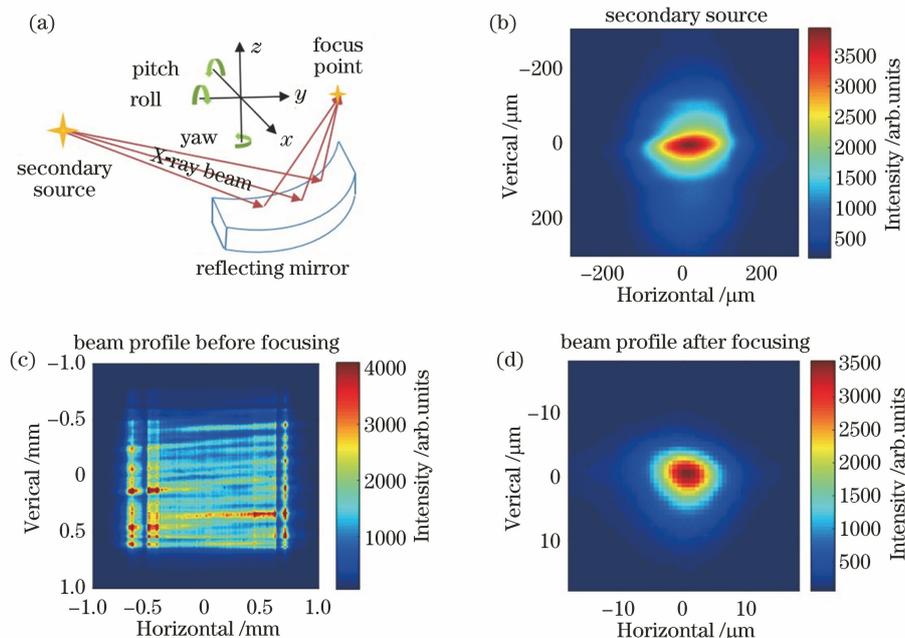


图 3 SSRF-USAXS 光束线站微聚焦 SAXS 实验站聚焦调试。(a)反射聚焦镜工作原理示意图;

(b)次级光源点光斑分布;(c)(d)聚焦前后光斑分布

Fig. 3 Beam profiles at microfocus SAXS experimental station of SSRF-USAXS before and after focusing operation. (a) Diagram of working principle of reflection focusing mirror; (b) beam spot profile of secondary source; (c)(d) beam spot profiles before and after focusing

光强分布如图 3(c)、(d)所示,聚焦前为长方形不规则分布的镜面反射光,尺寸达到 1 mm,条纹来源于反射镜面型误差;聚焦后则为尺寸小于  $10\ \mu\text{m}$  的高斯光斑。本文提出的光束监测装置的探测尺寸、像素尺寸和动态范围均能满足该线站聚焦调试要求。

### 3 光束性质实时监测与分析

SSRF-USAXS 对实验信号采集过程中的光束稳定性要求为样品处的光强抖动偏移量低于光强平均值的 5%,光斑位移抖动量需低于光斑尺寸的 5%,其中 USAXS 和微聚焦 SAXS 实验站的样品点分别位于距离光源点 70 m 和 101.5 m,基于在线监测装置采集的动态光束图像可以得出不同采样频率

下的光强稳定性、光斑位置和尺寸的偏移量。根据 USAXS 光束线布局可知,光斑的水平和垂直方向并不存在耦合关联。USAXS 样品点的光强分布如图 4(a)所示,首先对每张光强分布在水平和垂直方向开展一维积分并进行高斯拟合,得到聚焦光斑尺寸为  $189\ \mu\text{m} \times 175\ \mu\text{m}$ 。USAXS 实验站样品点处的光斑位置随时间的动态变化情况如图 4(b)所示,红绿蓝三色分别表示采样帧率为 1、10、100 frame/s,可以看出水平方向的光斑位置抖动幅度高于垂直方向,但与采样帧率无关。USAXS 实验站的时间分辨率验收指标为 10 ms,用户常用曝光帧率低于 100 frame/s,装置的采样帧率覆盖了大部分实验的时间过程。

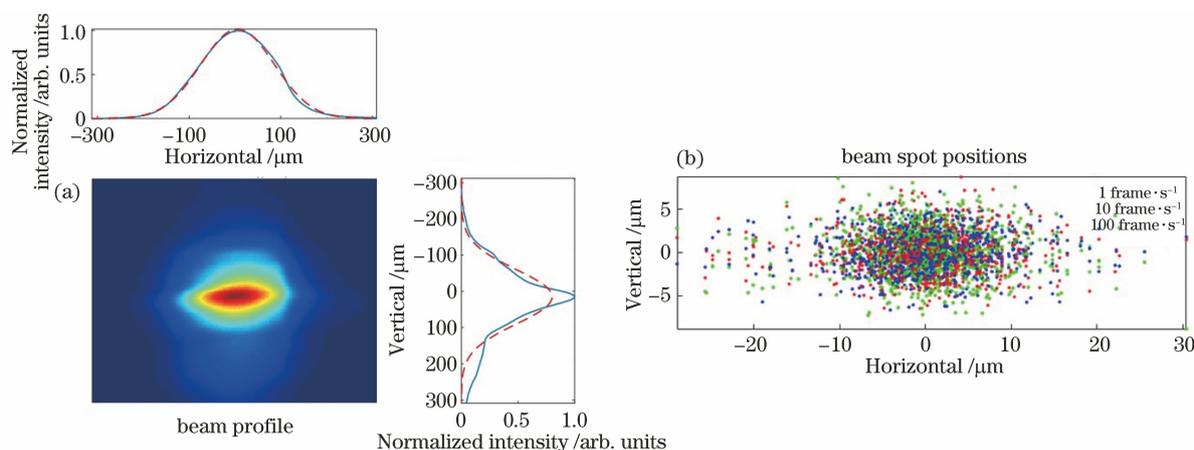


图 4 USAXS 实验站光斑动态监测。(a)光强二维分布,水平和垂直方向积分光强及高斯拟合;  
(b)不同采样帧率下光斑中心位置分布

Fig. 4 Dynamic monitoring of beam spot at USAXS experimental station; (a) Two-dimensional intensity profile, integrated intensity distributions and Gaussian fitting curves in both horizontal and vertical directions; (b) distribution of beam spot positions at different sampling frame rates

图 5 给出了不同采样帧率下,USAXS 实验站聚焦光斑的位置、通量和尺寸随时间的变化情况,并通过傅里叶变化(FFT),得到信号频域的变化情况;由图 5(a)数据可知,USAXS 聚焦光斑水平方向的位置抖动均高于垂直方向,而且在采样速度为 10 frame/s 的数据中,水平方向检测到频率为 3.3 Hz 的抖动特征峰;在采样速度为 100 frame/s 的数据中,水平方向得到频率为 10.1 Hz、21.8 Hz 和 24.2 Hz 的抖动特征峰,这表明光束线存在相关机械抖动;通过分析图 5(b)、(c)可知,70 m 处 USAXS 聚焦光束的通量和光斑尺寸随时间变化未检测到抖动特征峰。

对采集数据进行汇总(表 2)可知,USAXS 实验站样品处信号采集过程中的光束稳定性均小于典型值的 5%,满足实验要求;其中,光强抖动偏差量

的均方根(RMS)值均低于平均值的 2.2%,聚焦光斑位置偏差量的均方根值低于光斑尺寸的 3.5%,且水平方向抖动大于垂直方向;聚焦光斑的尺寸偏差值非常微小,但垂直方向的偏差大于水平方向。

距离光源点 101.5 m 的  $\mu\text{SAXS}$  实验站样品点处同样放置了光束在线监测装置;光强分布如图 6(a)所示,拟合后可知,聚焦光斑尺寸为  $9.46\ \mu\text{m} \times 8.01\ \mu\text{m}$ ,经分析得到光斑位置随时间的动态变化情况如图 6(b)所示,红绿蓝三色分别表示采样帧率为 1、10、100 frame/s,可以看出,水平和垂直方向的光斑位置抖动幅度基本一致,而且与采样帧率无关。

图 7 给出了不同采样帧率下, $\mu\text{SAXS}$  实验站聚焦光斑的位置、通量和尺寸随时间的变化情况,并通过傅里叶变化,得到信号频域的变化情况;由图 7(a)数据可知, $\mu\text{SAXS}$  聚焦光斑水平方向的位置抖

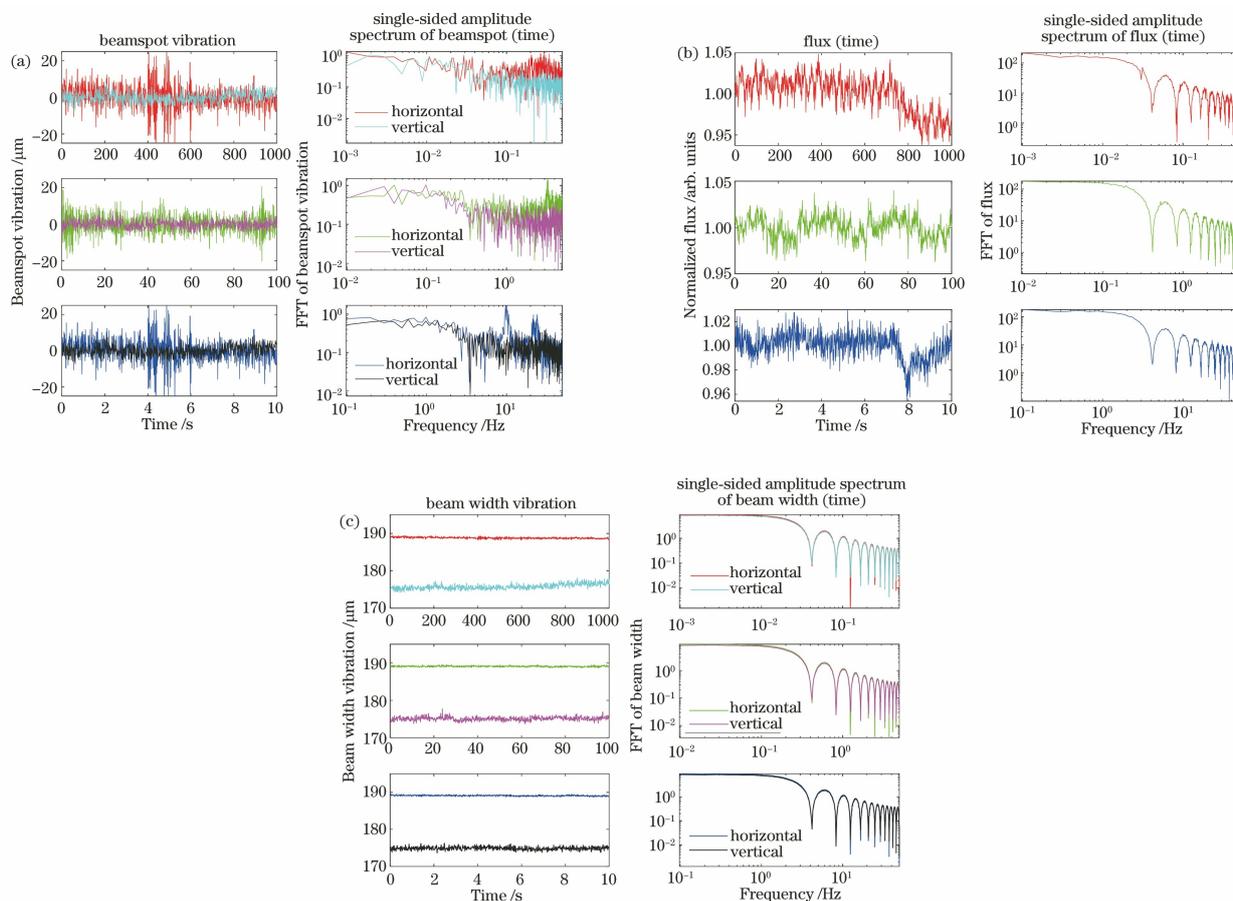


图 5 USAXS 实验站聚焦光斑的位置、通量和尺寸随时间的变化情况。(a)水平/垂直方向光斑位置；(b)归一化光通量；(c)水平/垂直方向半峰全宽随时间变化及时频域分析(不同采样帧率:1、10、100 frame/s)  
 Fig. 5 Changes in the position, flux, and size of the focus spot at USAXS experimental station with time under different sampling frame rates. (a) Horizontal/vertical spot position; (b) normalized luminous flu; (c) horizontal/vertical direction full width at half maximum change with time and frequency domain analysis (different sampling frame rates: 1, 10, and 100 frame/s)

表 2 USAXS 实验站归一化束流、水平/垂直束斑位置和宽度偏差的均方根值  
 Table 2 RMS value of the deviation of normalized beam flux, horizontal/vertical beam spot position, and width deviation at USAXS experimental station

Frame rate / (frame · s <sup>-1</sup> )	1	10	100
Flux / %	2.20	1.20	1.07
Beam spot (H % × V %)	3.49 × 1.56	2.84 × 1.38	2.43 × 1.34
Beam width (H % × V %)	0.10 × 0.38	0.08 × 0.28	0.07 × 0.25

动均高于垂直方向,而且在水平方向检测到频率为 6.8、14.4、25.2、28.6、36.5 Hz 的抖动特征峰,在垂直方向检测到了频率为 14.2、26.9、31.8、36.2 Hz 的抖动特征峰,这表明 KB 镜处有相应频率的机械抖动。通过分析图 7(b)、(c)可知,70 m 处 μSAXS 聚焦光束的通量和光斑尺寸随时间变化未检测到抖动特征峰。

对 μSAXS 实验站采集数据进行汇总(表 3)可知,μSAXS 实验站样品处信号采集过程中的光束稳定性均小于典型值的 5%,完全满足实验要求;其中

光强抖动偏差量的均方根值均低于光强平均值的 2.84%,聚焦光斑位置偏差量的均方根值均低于光斑尺寸的 3.29%,且水平方向抖动大于垂直方向;聚焦光斑的尺寸偏差值同样非常微小,而且水平和垂直方向的偏差基本一致。

此外,本文利用能流法<sup>[21]</sup>对入射光波前的实时变化量进行了处理。与文献中能流法稍有区别的是,我们没有利用砂纸形成的散斑图,而是直接用采集到的光强分布图进行相位重建。利用近场散斑痕迹相衬成像法<sup>[21]</sup>的原理:将第一幅强度图视为参考

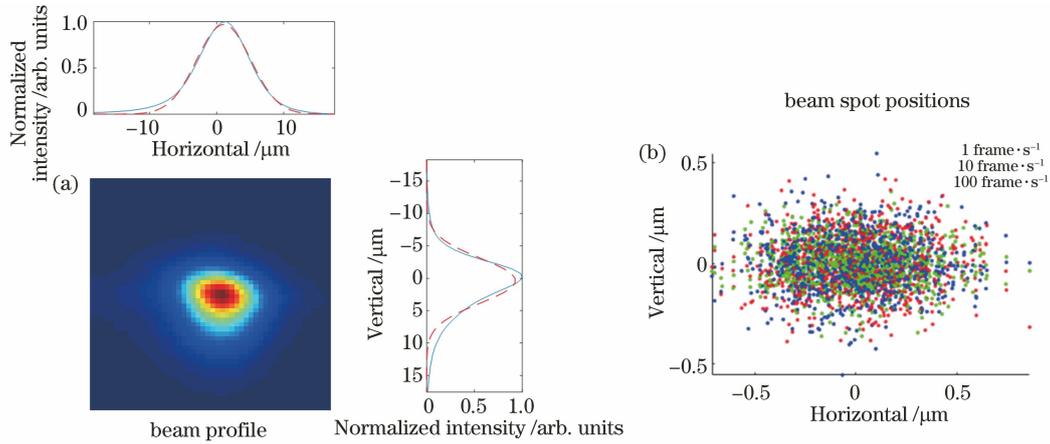


图 6 USAXS 实验站光斑动态监测。(a) 光强二维分布, 水平和垂直方向积分光强及高斯拟合; (b) 不同采样帧率下光斑中心位置分布

Fig. 6 Dynamic monitoring of beam spot at  $\mu$ SAXS experimental station. (a) Two-dimensional intensity profile, integrated intensity distributions and Gaussian fitting curves in both horizontal and vertical directions; (b) distribution of beam spot positions at different sampling frame rates

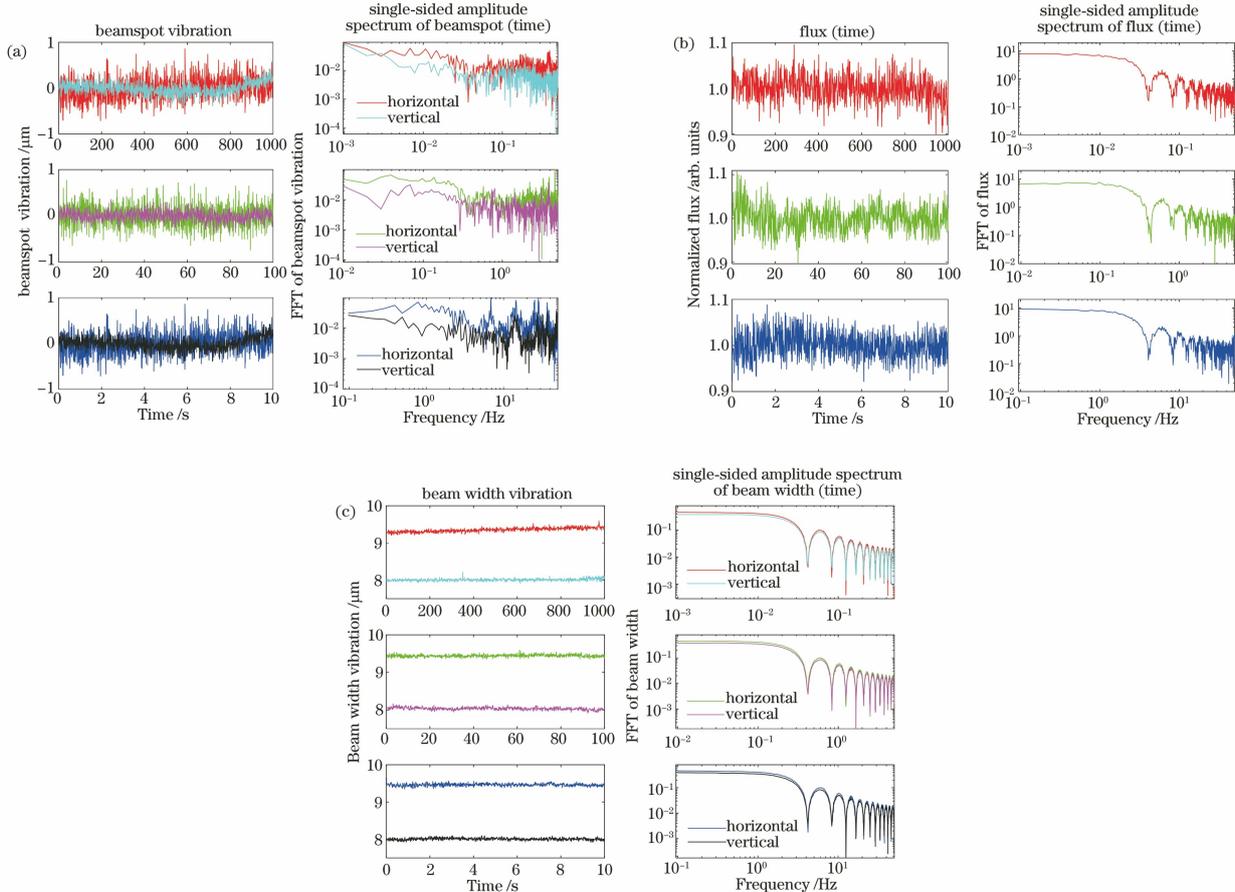


图 7  $\mu$ SAXS 实验站聚焦光斑的位置、通量和尺寸随时间的变化情况。(a) 水平/垂直方向光斑位置; (b) 归一化光通量; (c) 水平/垂直方向半峰全宽随时间变化及时频域分析(不同采样帧率: 1、10、100 frame/s)

Fig. 7 Changes in the position, flux, and size of the focus spot at  $\mu$ SAXS experimental station with time under different sampling frame rates. (a) Horizontal/vertical spot position; (b) normalized luminous flux; (c) horizontal/vertical direction full width at half maximum change with time and frequency domain analysis (different sampling frame rates: 1, 10, and 100 frame/s)

表 3  $\mu$ SAXS 实验站归一化光束通量、水平/垂直光束点位置和宽度偏差的均方根值Table 3 RMS value of the deviation of normalized beam flux, horizontal/vertical beam spot positions, and width deviation at  $\mu$ SAXS experimental station

Frame rate / (frame $\cdot$ s $^{-1}$ )	1	10	100
Flux / %	2.82	2.81	2.84
Beam spot (H % $\times$ V %)	2.67 $\times$ 1.66	2.54 $\times$ 1.34	3.29 $\times$ 1.67
Beam width (H % $\times$ V %)	0.58 $\times$ 0.39	0.35 $\times$ 0.43	0.37 $\times$ 0.37

图,随后采集到的强度图由于波前的变化导致强度分布出现变化,利用相应的算法即可从强度分布变化中定量地得到波前的相对变化量。实验中处理得到的结果是第一张强度图与之后每一张强度图对应

的波前变化量。这样就完成了利用单个探测器进行定量相位分析的功能。图 8(a)~(c)展示了 70 m 处 USAXS 聚焦光束在 1 frame/s 采集速度下的入射光波前相对变化量。

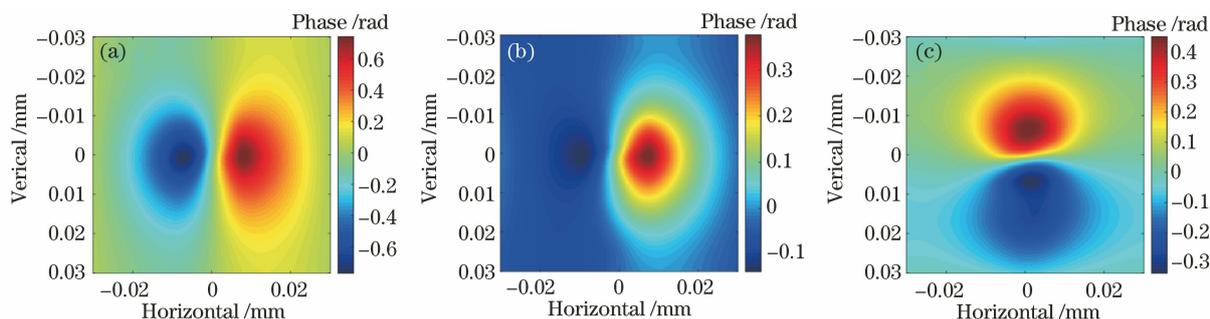


图 8 USAXS 实验站入射光实时相位相对变化量

Fig. 8 Real-time relative phase variation of incident wavefront at USAXS experimental station

## 4 结 论

同步辐射 X 射线光束的光斑位置、尺寸以及入射波前的稳定性对实验尤为重要,对这些参数定量评测是目前光束线站实验中需要解决的一个关键问题。本文设计了一种基于荧光屏成像的 X 射线光束在线监测装置,用于上海光源硬 X 射线光束实时在线监测。相较于现有的四象限 X 射线光束位置监视器(QBPM)和气体电离室,该装置具有监测光束位置、通量、光强分布、波前相对变化量的功能,且不影响下游实验开展,能实现达到 2 kHz 高速采集。利用该装置在 SSRF-USAXS 线站采集数据并进行时频域信号分析,得到了该线站光束通量、位置、尺寸、入射光波前随时间的变化情况,解析了外界环境影响。未来将基于该装置实现光学器件和实验位置实时在线反馈,进一步实现光束稳定,满足高分辨实验要求。

## 参 考 文 献

- [1] Ma L D, Yang F J. Introduction to synchrotron radiation applications [M]. Shanghai: Fudan University Press, 2001.  
马礼敦, 杨福家. 同步辐射应用概论[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2001.
- [2] Xu Z Y. Optics and engineering of synchrotron radiation [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2013: 1-8.  
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: 1-8.
- [3] Juranić P, Rehanek J, Arrell C A, et al. SwissFEL Aramis beamline photon diagnostics. Erratum [J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2019, 26(3): 906.
- [4] Liu Y W, Seaberg M, Zhu D L, et al. High-accuracy wavefront sensing for X-ray free electron lasers[J]. Optica, 2018, 5(8): 967-975.
- [5] Tian N X, Jiang H, Li A G, et al. Study on phase compensation mirror used for hard X-ray synchrotron radiation[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0934001.  
田纳玺, 蒋晖, 李爱国, 等. 用于同步辐射的硬 X 射线相位补偿镜的研究[J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0934001.
- [6] 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.
- [7] Park J Y, Kim Y, Lee S, et al. X-ray beam-position feedback system with easy-to-use beam-position monitor[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2018, 25(3): 869-873.
- [8] Hua W Q, Zhou G Z, Hu Z, et al. On-line monitoring of the spatial properties of hard X-ray

- free-electron lasers based on a grating splitter [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2019, 26(3): 619-628.
- [9] Zhu H C, Tong Y J, Ji T, et al. Spatial resolution measurement of synchrotron radiation infrared microspectroscopy beamline [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0430002.  
朱化春, 佟亚军, 吉特, 等. 同步辐射红外谱学显微光束线的空间分辨率测试 [J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0430002.
- [10] Li C, Liu M T, Zhang Z Y, et al. Method for energy bandwidth measurement of synchrotron radiation focused beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(19): 1934001.  
李闯, 刘孟廷, 张增艳, 等. 同步辐射聚焦光束能量带宽的检测方法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(19): 1934001.
- [11] Yang S C, Yu H, Lu R H, et al. Energy spectrum broadening correction in X-ray interferometry via intensity correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1034001.  
杨善初, 喻虹, 陆荣华, 等. X射线强度关联干涉测量能谱展宽校正 [J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1034001.
- [12] Hu B L, Wang X, Li W, et al. Wavefront distortion effect on far-field spatio-temporal distribution in compression and focusing process [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1132001.  
胡必龙, 王道, 李伟, 等. 压缩聚焦过程中的波前畸变对远场时空分布影响 [J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 1132001.
- [13] van Silfhout R G, Manolopoulos S, Kyele N R, et al. *In situ* high-speed synchrotron X-ray beam profiling and position monitoring [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 133(1): 82-87.
- [14] Fuchs M R, Holldack K, Reichardt G, et al. Transmissive imaging X-ray beam position monitors (XBPM) for protein crystallography (PX) beamlines [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2007, 879: 1006.
- [15] Sato K. A position-sensitive ionization chamber for XAFS studies at synchrotron sources [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2001, 8(2): 378-380.
- [16] Desjardins K, Pomorski M, Morse J. Ultra-thin optical grade scCVD diamond as X-ray beam position monitor [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2014, 21(6): 1217-1223.
- [17] Nida S, Tsibizov A, Ziemann T, et al. Silicon carbide X-ray beam position monitors for synchrotron applications [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2019, 26(1): 28-35.
- [18] Cui Y, Wang Q S, Huang S, et al. Transmission-mode diamond X-ray position sensitive detector and its applications in synchrotron radiation beamlines [J]. *Nuclear Techniques*, 2016, 39(7): 070101.  
崔莹, 汪启胜, 黄胜, 等. 穿透型金刚石 X射线位置灵敏探测器及其在同步辐射光束线上的应用 [J]. *核技术*, 2016, 39(7): 070101.
- [19] Fajardo P, Ferrer S. Beam monitor for undulator white radiation in the hard-X-ray range [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(2): 1879-1881.
- [20] Takahashi S, Kudo T, Sano M, et al. New X-ray pink-beam profile monitor system for the SPring-8 beamline front-end [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(8): 083111.
- [21] Paganin D M, Labriet H, Brun E, et al. Single-image geometric-flow X-ray speckle tracking [J]. *Physical Review A*, 2018, 98(5): 053813.
- [22] Koch A, Risch J, Freund W, et al. Operation of photon diagnostic imagers for beam commissioning at the European XFEL [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2019, 26(5): 1489-1495.
- [23] Narayanan T, Sztucki M, van Vaerenbergh P, et al. A multipurpose instrument for time-resolved ultra-small-angle and coherent X-ray scattering [J]. *Journal of Applied Crystallography*, 2018, 51(6): 1511-1524.