

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

崔莹¹ 汪启胜¹ 黄胜¹ 张坤浩¹ 李冰¹ 徐琴¹ 王志军¹
Michal Pomorski² 徐慧超¹ 潘强岩¹ 何建华¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (Diamond Sensors Laboratory, CEA LIST, France)

摘要 X射线位置灵敏探测器是同步辐射光束线上不可缺少的重要部件,由它所提供的光束位置和强度的实时数据是监测光束线运行状态的重要依据。为适应对高亮度同步辐射光束的测量需要,我们成功地研制了一套穿透型金刚石位置灵敏探测器,并在上海光源生物大分子结构晶体学束线(BL17U1)上对其性能进行了测定。测量数据表明,在整块探测器(2.5 mm×2.5 mm)上均具有极好的线性响应,探测器的信/噪比(S/N)>5×10³,位置分辨能力为 $\sigma=(136\pm11)$ nm,光强强度的测量精度和线性度均<0.1%,能满足第三代同步辐射和第四代光源(自由电子激光)束线上对光强、光斑位置及其运动轨迹的监测需求,是束线诊断的重要设备。

关键词 穿透型金刚石 X射线位置灵敏探测器,亚微米位置分辨

中图分类号 TL54⁺4

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.070101

Transmission-mode diamond X-ray position sensitive detector and its applications in synchrotron radiation beamlines

CUI Ying¹ WANG Qisheng¹ HUANG Sheng¹ ZHANG Kunhao¹ LI Bing¹ XU Qin¹
WANG Zhijun¹ Michal Pomorski² XU Huichao¹ PAN Qiangyan¹ HE Jianhua¹

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

2(Diamond Sensors Laboratory, CEA LIST, France)

Abstract Background: X-ray position sensitive detector is indispensable for beamlines at synchrotron radiation facilities. Synthetic single-crystal diamond position sensitive detectors have been developed to take advantage of next-generation synchrotron sources, which are trending toward use of high-flux beams and/or beams requiring enhanced stability and precise understanding of beam position and intensity from the front end of the beamline all the way to the sample in recent years. **Purpose:** It is aimed to provide accurate real-time position and flux for high-flux X-ray beams. **Methods:** Based on the principle of potentiometers, the transmission-mode diamond X-ray position sensitive detector works as a “solid” ionization chamber. When the X-ray beam comes into the detector’s sensitive region, electronic-holes occur due to the effect of ionization and the charges or the current pulses on the electrodes of the detector are given. According to the collected currents on the electrodes, the location of the incident X-ray can be

国家重点基础研究发展规划(973 计划) (No.2011CB911102)、中国科学院战略性先导科技专项(B 类)(No.XDB08030101)、青年学者发展协作组(No.11505276)资助

第一作者: 崔莹, 女, 1988 年出生, 2013 年于东北大学获硕士学位, 研究领域为光束线站自动化控制

通信作者: 何建华, E-mail: hejianhua@sinap.ac.cn

Supported by National Program on Key Basic Research Project (973 Program) (No.2011CB911102), the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No.XDB08030101), Young Scholars Development Cooperation Group (No.11505276)

First author: CUI Ying, female, born in 1988, graduated from Northeastern University with a master’s degree in 2013, focusing on beam line station automation control

Corresponding author: HE Jianhua, E-mail: hejianhua@sinap.ac.cn

收稿日期: 2016-03-17, 修回日期: 2016-05-11

determined by the ratio between the current difference of electrodes and the total current. **Results:** A signal/noise ratio of $(S/N) > 5 \times 10^3$ and a position resolution of $\sigma = (136 \pm 11)$ nm for the synthetic single-crystal diamond position sensitive detector with an active area of 2.5 mm $\times$ 2.5 mm, respectively, have been obtained. The measurement precisions for the X-ray beam intensity and position linearity are less than 0.1%. **Conclusion:** We have demonstrated the feasibility of building a transmission-mode synthetic single-crystal diamond X-ray position sensitive detector, which could measure X-ray beam intensity and position in real time. Its performance was determined on the macromolecular crystallography beamline (BL17U1) at SSRF. Experimental data show that the diamond detector has good linear response and measurement precision of beam intensity within the whole active area.

Key words Transmission-mode diamond X-ray position sensitive detector, Submicron position resolution

X 射线位置灵敏探测器是同步辐射光束线上不可缺少的重要元件, 它所提供的光束位置和强度的实时数据是监测光束线运行状态的重要依据。由位于储存环中的光源、前端区中的光学器件、实验站和数据获取室等几部分所构成的同步辐射光束线, 总长度大于 60 m, 甚至需要超 100 m。其中位于光束线前端区的部分光学器件一直要受到热功率为 0.2–2 kW 的高热密度的辐照, 均需配有冷却系统以保证它们的工作稳定。一旦其中任何一组 X 射线光学器件由于热漂移和振动不稳定性(通过本地设备的操作或通过地板本身而引入)等不可避免的因素造成小的位置和角运动均可以在样品处引起比光斑本身尺寸大得多的位置变化。因此, 实现光束线的原位、千赫兹测量带宽的精确位置监测、并保持样品处光斑位置的高度稳定(漂移小于光斑本身的尺寸, 例如 10%)的任务就由 X 射线位置灵敏探测器所构成的测量系统来完成。

目前世界上一些光源所使用的典型的 XBPM (X-ray beam position monitor)有丝扫描^[1–2]、电离室^[3–5]、金刚石刀片型^[6–7]、荧光四象限型^[8–11]和半导体^[12–14]或金刚石面型^[15–19]等。从发展趋势来看, 在第三代同步辐射装置和以后的第四代更高亮度自由电子激光光源上所使用的 XBPM 除了在时间响应、光强测量、位置测量精度等常规参数外, 对探测器的抗辐射能力和耐热能力具有极高的要求。表

1 给出了适合在第三代同步辐射束线上使用的位置灵敏探测器的一些具体的定性和定量指标的要求。其中穿透型金刚石面型的 XBPM 除了能满足目前同步辐射和未来的自由电子激光的亚微米测量精度外, 它是真正的测定光强重心位置, 并具有位置灵敏面积大、占空小(可以做得非常紧凑, 沿束线方向占用的空间只有几毫米)、信/噪比大、光效率高以及避免串扰(cross-talk issue)、兼容超高真空系统的高温烘烤等要求外还具有透射率较高、耐辐射性能好、漏电流小(可忽略不计)和响应速度非常快等诸多优势, 是目前同步辐射装置和以后的第四代更高亮度自由电子激光光源的必然选择。因为在第四代光源(自由电子激光)的情况下, 源和样品之间的距离往往大于同步辐射。在数百米的范围内, 光源和光学系统所需的稳定性更难达到。此外, 很多的实验需要 pulse-by-pulse 脉冲位置和时间信息。除气体探测器外, 金刚石可能是唯一的一种能够承受如欧洲 XFEL (X-ray Free-Electron Laser)的工作模式下热机械变形的材料: 要求在 600 μ s 内测量到 2 700 脉冲与 10^{12} 光子/脉冲。我们所研制的一套穿透型金刚石面型 XBPM 就是依据这些未来的需求而展开的。本文在阐述它的工作原理及其结构的基础上, 详细地给出了在上海光源生物大分子结构晶体学束线(BL17U1)上对其性能的测试结果。

表 1 对同步辐射光束线上所使用的 X 射线位置灵敏探测器的具体要求
Table 1 The specific requirements of the X-ray beam position monitor on synchrotron radiation beam lines.

指标 Target	定性或定量的要求 Qualitative or quantitative requirements
位置分辨能力 Position resolution	对于光束尺寸为 0.1–50 μ m 的测量稳定度约 10% The stability of the beam size within 0.1–50 μ m: ~10%. 对聚焦尺寸为纳米级别(例如 100 nm)的光斑的分辨能力, 要达到理想的目标→10 nm The resolution capability of the spot whose focus size is nanoscale (such as 100 nm) should achieve ideal goal→10 nm. 测量速率(带宽)~1 kHz(声波的振动频率), 最好能达到 10 kHz 的目标 Measuring frequency (bandwidth) ~1 kHz (sound wave frequency). It's best to reach the target 10 kHz. 亚微米的位置分辨能力是目前大多数光束线的要求 Most beam line now require the position resolution capability to submicron level.

(续表 1)

指标 Target	定性或定量的要求 Qualitative or quantitative requirements
强度 Intensity	对光强的测量精度和线性度要达到 $\leq 0.1\%$ The measurement accuracy and linearity of intensity should achieve $\leq 0.1\%$.
快响应时间 Fast time response	要满足“激光泵浦-X 射线脉冲探针”类型的单脉冲响应的实验需求。同步辐射的脉冲宽度约 50 ps, 也就是要达到 $10^5\text{--}10^8\text{ pulse}\cdot\text{s}^{-1}$ 的带宽 Meet the demand of single impulse response experiment like “Laser pumped X-ray pulse probe”. The pulse width of synchrotron radiation $\sim 50\text{ ps}$, so the bandwidth should achieve $10^5\text{--}10^8\text{ pulses}\cdot\text{s}^{-1}$.
抗辐照能力 The radiation-proof ability	抗电离辐射能力 $>10^4\text{ Gray}\cdot\text{s}^{-1}$ The ionizing radiation-proof ability $>10^4\text{ Gray}\cdot\text{s}^{-1}$.
耐热 Heat-resisting	具有吸收 X 射线热功率 (最大): $\leq$ 几毫瓦 (单色光束线上); 对于插入件的白光, 具有 $\geq 100\text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$ 的能力。满足这一条件的唯一可能材料是金刚石 Absorptive capacity of X-ray thermal power (max): $\leq$ a few mill watt (monochromatic beam line). For white light of insertion device, capacity should be at least $\geq 100\text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$. Only possible material is diamond.
其他 others	与光束的接触面尽可能小, 这样能减少对 X 射线的吸收、散射等所引起的光强损失, 与光束线具有很好的兼容性 To reduce the absorption from X-ray and the loss of light intensity from scattering, the contact area with the beam should be as small as possible. 紧凑封装, 能在大气、低真空和高真空的环境中运行 High integration, adapted to atmosphere, low vacuum and high vacuum environment.

1 工作原理与结构

1.1 位置灵敏探测器的工作原理

形象地说, 位置灵敏探测器的工作原理就是电位器原理。在探测器上安装有位置对称的两个电极, 并在电极上加有一定的偏压。当 X 射线束进入探测器的灵敏区时, 由于电离作用在灵敏区产生一定数量的电子-空穴对。电子与空穴在电场作用下分别向两极运动, 并被电极收集而给出电荷或电流脉冲。根据同一电极两端所收集到的脉冲电流值的差异与总电流值之比, 就能确定入射的 X 射线束重心位置。

二维位置灵敏探测器有两种不同的脉冲电流收集方式: 单侧面四角点读出(图 1(a))和双侧面双条边读出(图 1(b))。单侧面四角点读出模式具有位置探测强、分辨能力高等优点, 但制作比较困难; 双侧面双条边读出模式具有暗电流低、响应速度快等特点。根据同一方向所收集到的脉冲电流值的差异与 4 路总电流值之比来确定入射 X 射线束位置。

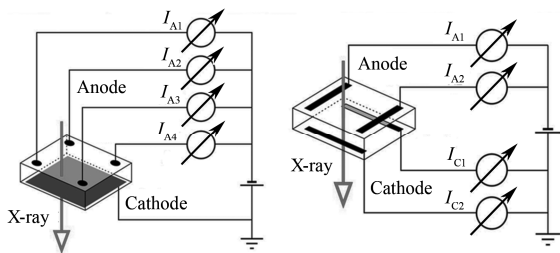


图 1 穿透型位置灵敏面型探测器的两种典型的工作模式
Fig.1 Two typical working modes of the transmission-mode position monitors.

单侧面四角点读出模式的有:

$$\begin{aligned} x &= k_1 \frac{I_{A1} + I_{A3} - (I_{A2} + I_{A4})}{I_{A1} + I_{A2} + I_{A3} + I_{A4}} \\ y &= k_2 \frac{I_{A1} + I_{A2} - (I_{A3} + I_{A4})}{I_{A1} + I_{A2} + I_{A3} + I_{A4}} \end{aligned} \quad (1)$$

双侧面双条边读出为:

$$\begin{aligned} x &= k_1 \frac{I_{A1} - I_{A2}}{I_{A1} + I_{A2}} \\ y &= k_2 \frac{I_{C1} - I_{C2}}{I_{C1} + I_{C2}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, k_1 和 k_2 为探测器的刻度系数。

1.2 穿透型金刚石位置灵敏探测器的结构及其制作工艺

1.2.1 结构

金刚石位置灵敏探测器的工作原理就是一种永久的机械坚固的位置敏感的“固态电离室”。图 2 是穿透型金刚石位置灵敏探测器的结构示意图。中间是一块尺寸为 $2.5\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$ 、厚度为 0.2 mm 单晶金刚石板。金刚石板的上下表面均涂盖有厚度为几百个纳米的类金刚石(Diamond-like carbon, DLC)非晶硬碳膜的电阻层, 阻值为 $20\text{--}200\text{ k}\Omega$ 。之所以选择 DLC 材料作为制备探测器的电阻层, 是因为

DLC 非晶硬碳膜的性质近似于金刚石并具有高硬度、高电阻率和良好光学性能等优点, 同时又具有自身独特摩擦学特性, 与金刚石有很好的附着力。每一电阻层的对称侧边缘均镀有金属(铝)条作为电极。最后将探测器用导热性能好的环氧树脂粘合在氮化铝陶瓷底座上, 再用焊线把 4 个电极经由陶瓷底座引出焊接到一个专用的印刷电路(Printed Circuit Board, PCB)板上并将印刷电路板上的 4 个焊点与 4 个同轴电缆相连接。整个制作过程在法国 CEA-LIST (Diamond Sensors Laboratory)完成。

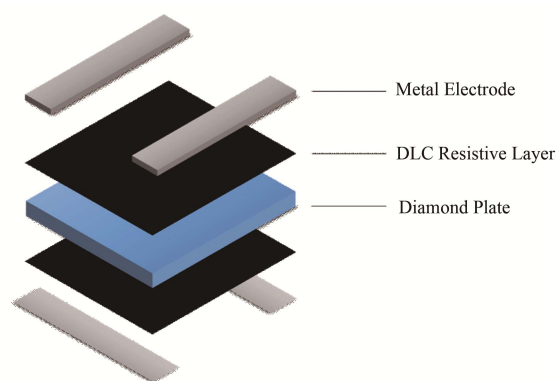


图 2 穿透型金刚石位置灵敏探测器的结构示意图
Fig.2 Schematic display of the transmission-mode diamond XBPM Structure.

1.2.2 工艺

1) 单晶金刚石的切割与表面处理

单晶金刚石板是英国 Element Six 公司采购而来, 晶体取向(001)。根据尺寸要求, 采用激光把单晶金刚石板切割成型。用热酸溶液彻底清洗单晶金刚石板, 从而消除任何可能的激光切割后残留在表面的有机和金属污染附着物和切割痕迹。

金刚石板的尺寸是根据实际需要, 例如光斑的尺寸及其位置漂移范围。对于上海光源生物大分子结构晶体学束线(BL17U1)^[20]而言, 样品处聚焦光斑的典型尺寸约为 $130\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$, 长期的位置漂移范围 $< 0.5\ \text{mm}$ 。因此, $2.5\ \text{mm} \times 2.5\ \text{mm}$ 的尺寸足以覆盖光束可能移动的范围。另外, 金刚石板的厚度决定了探测器的信/噪比和它对 X 射线的吸收、散射等效应所引起的光强损失。对于 X 射线束穿过一定厚度物质后的透射率计算, 有许多网站或文献均能提供。就束线而言, 典型的能量为 $12.662\ \text{keV}$ 的 X 射线束穿过 $0.2\ \text{mm}$ 厚度金刚石板的透射率为 95.8% 。只有 4.2% 损失量是完全可以容忍的。

2) DLC 电阻层的沉积

下面把经过表面清洗后的金刚石片安装在一个镀遮罩的专用系统上, 用 Ar 溅射方法的磁控管 PVD (Physical Vapor Deposition) 制膜装置将金刚石板的

正反两面镀上 DLC 电阻层(厚度 $< 500\ \text{nm}$)。

DLC 电阻层在保证金刚石板内部电场均匀分布的同时, 起着与金属丝定位一样的作用, 位置信息就是根据 DLC 电阻层上相对的两条电极上所收集到的电荷量计算而得到。

3) 金属电极条电极的制作

完成 DLC 电阻层制作, 采用同样的制作方法完成金属(铝)电极条(厚度 $< 500\ \text{nm}$)电极的沉积。

4) 探测器的安装

为安装探测器, 制作了一个专用的有 4 个焊接点的印刷电路板和有 4 个 SMA (Sub Miniature version A)接头的铝盒外壳。首先用导热性能良好的环氧树脂把探测器粘合在该电路板上。待环氧树脂凝固后再用导线分别将导线的两头焊接到金刚石上的 4 个电极和印刷电路板上, 印刷电路板上的 4 个焊点与铝外壳的 4 个同轴电缆相连接。

5) 线路的检查

将探测器的 4 路分别检查, 排除短路。正反两个表面的电阻值保证在 $20\text{--}200\ \text{k}\Omega$ 内。保证在外加 $1\ \text{V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 的工作偏压或电场下, 各路暗电流不超过几个皮安即可, 否则探测器需要进行再加工。

2 探测器的读出电子学和数据获取

探测器的数据采集部分是通过选用专用于 XBPM 的数字信号处理器 Libera Photon^[21]进行测量数据的采集和处理。该数字信号处理器可以同时采集 4 路信号, 包含 XBPM 信号处理的多种功能模块, 不仅可以实现对位置灵敏探测器 4 路信号的快、慢速数据采集, 且保证在不同的量程和采样速率下均有较高的分辨率(表 2)^[22-23]。同时, 其自身集成了单片机、现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)、模拟模块、数字模块等多个硬件模块, 能够在设备内部独立处理 XBPM 所需的部分高速计算。其单片机中运行 Linux 操作系统, 更加方便有效地实现在多种通讯协议下与远程计算机之间的数据交互。

数据采集方式主要有低速采集和高速采集。其中, 低速采集方式是指通过 Libera Photon 信号处理器慢速通道采集频率为 $10\ \text{Hz}$ 的信号。高速采集方式是指通过 Libera Photon 信号处理器快速通道采集频率为 $10\ \text{kHz}$ 的信号。数据采集的软件程序使用的是目前 BL17U1 线站常规所使用的 EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) 软件系统。该软件系统采用分布式软件结构, 包含了 OPI (Operator Interface) 界面以及 IOC (Input/output Controller) 控制器, 且底层设备有较好的独立

性。数据采集软件程序是通过远程终端机中运行软 IOC，周期性读取和计算本地 Libera 设备 IOC 所提供的数据。为增加软件灵活性，在本地和远程 PC

端都采取实时计算位置信号和实时修改计算参数的方式。软件可以移植到该局域网内的任意电脑上，无需其他更改，便于使用。

表 2 位置数字信号处理器 Libera Photon 的性能规格^[22]
Table 2 The performance and specifications of Libera Photon^[22].

量程 Measurement range / nA	典型带宽 Bandwidth (typical) / kHz	电流分辨 Current resolution / pA	位置分辨 Position resolution / μm	位置分辨与电流依赖 Current dependence / μm
± 2	0.5	3	3	1.2
± 20	1	4	0.3	0.8
± 200	2	7	0.07	0.7
$\pm 2\,000$	2	20	0.02	0.6
$\pm 20\,000$	2	180	0.02	0.5
$\pm 200\,000$	2	1\,800	0.02	0.3
$\pm 1\,850\,000$	2	18\,000	0.01	0

另外，数据采集也可通过 Libera Photon 设备本身的软件指令进行本地获取，如：通过指令“libera -0 1000”可以本地获取快速缓存通道的 1 000 个样点，具体获取指令可参见说明书中的 libera 指令集^[8]。通过该方式可以完成本地获取采集速度分别为 10 Hz、10 kHz 等多个通道的数据。

3 结果与讨论

探测器性能的测试是在上海光源生物大分子结构晶体学束线(BL17U1)^[20]上完成。所用的 X 射线束的光子能量为 12.662 keV，光通量约为

$3.6 \times 10^{12} \text{ photon} \cdot \text{s}^{-1}$ ，样品处聚焦光斑尺寸约为 $130 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ 。探测器被安装在距样品处上游 0.5 m 处。根据 4 个方向所收集到的脉冲电流值的时序谱，就能得到光束位置的二维图谱与光强变化。图 3 显示了所采集到的探测器的 4 路脉冲电流值的时序谱。根据所采集到的 4 路电流数据，得到探测器的信/噪比(S/N) $> 5 \times 10^3$ ，光强的测量精度 $< 0.1\%$ 。图 3 上的锯齿型花纹源于光源的 Top-Up 运行模式，这也说明探测器真实地体现了存储环中电子束或光束线上的光束强的实时情况。

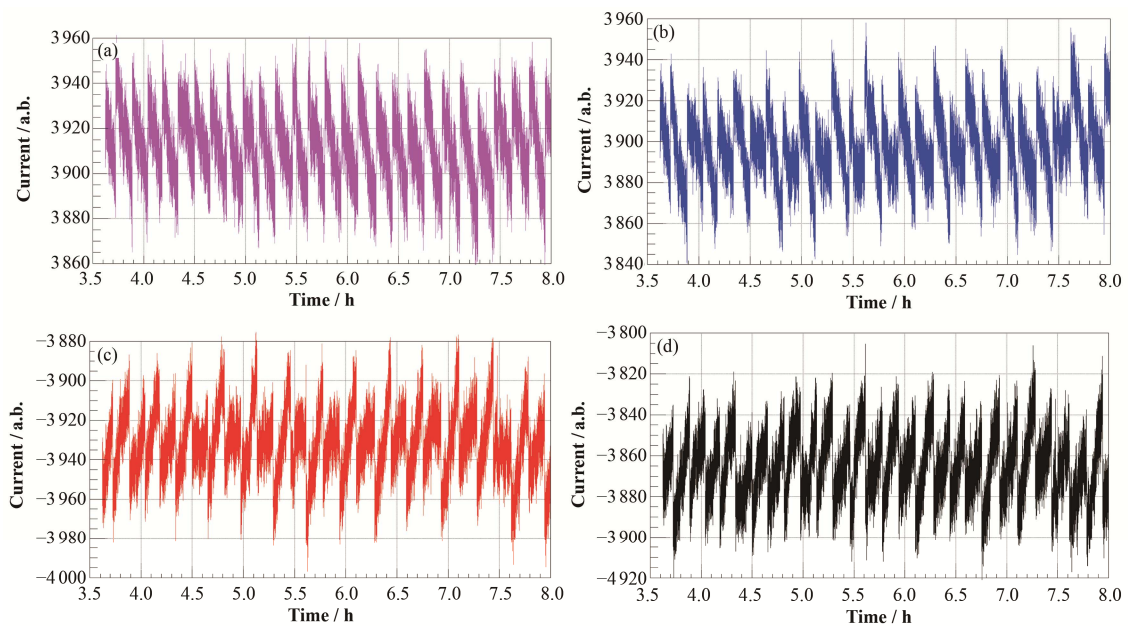


图 3 探测器获得的 4 路脉冲电流值的时序谱
(a)、(b) 水平方向，(c)、(d) 垂直方向

Fig.3 Detector current spectra.

(a) and (b) are obtained from horizontal position, (c) and (d) from vertical position

为获得光束位置, 我们首先对探测器进行了位置刻度。探测器是被安装在二维滑台上, 通过移动滑台的位置, 就能得到探测器在水平与垂直两个方向的刻度系数(图 4)。探测器是被固定在二维滑台上, 水平方向是二维滑台的位置, 垂直方向是根据探测器所收集到的脉冲电流值得到的 X 射线束的两个方向的相对位置。利用探测器灵敏区域内的数据, 得到水平与垂直方向的刻度系数 $k_1=1\,373.25$ 和 $k_2=1\,365.75$, 线性度 $<0.1\%$ 。图 4 中的刻度数据也清楚地表明, 尺寸为 $2.5\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$ 整块金刚石板均能作为灵敏工作区域。

探测器工作电压的选取是根据 4 路电流值来确定的。在稳定的束流强度下, 当逐渐增加偏压到某一数值时, 电流值达到饱和状态时所对应的偏压, 就是探测器的工作电压。就目前的探测器, 此时所对应的偏压为 -80 V 。

至此, 我们就可以获得光束的位置及其运动轨迹分布。根据同一方向所收集到的脉冲电流值的差异与 4 路总电流值之比来确定入射 X 射线束水平和垂直位置, 如图 5 所示。由图 5 可见, 上海光源生物大分子结构晶体学束线的光斑是沿着逆时针方向做周期性漂移的椭圆运动轨迹, 轨迹的峰值为

$5\text{--}8\text{ }\mu\text{m}$, 周期约为 25 min 。探测器本身的位置分辨能力为 $\sigma=(136\pm 11)\text{ nm}$ 。数据采集于 2015 年 4 月 15 日 03:30–08:30。图 5(a)为水平与垂直方向的运动轨迹时序图, 图 5(b)是二维轨迹图, 将数据点与中心值的偏离做一分布, 就可以获得探测器的位置分辨 $\sigma=(136\pm 11)\text{ nm}$, 如图 5(b)的右上角所示。图 5(a)中的数据也清楚地显示出光斑还会有一定的几率偶尔偏离轨道, 这其中的原因有待于今后进一步调试与摸索。

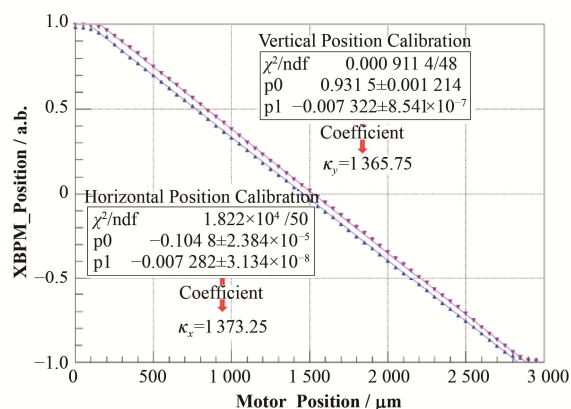


图 4 探测器位置刻度
Fig.4 Position calibrations for the detector.

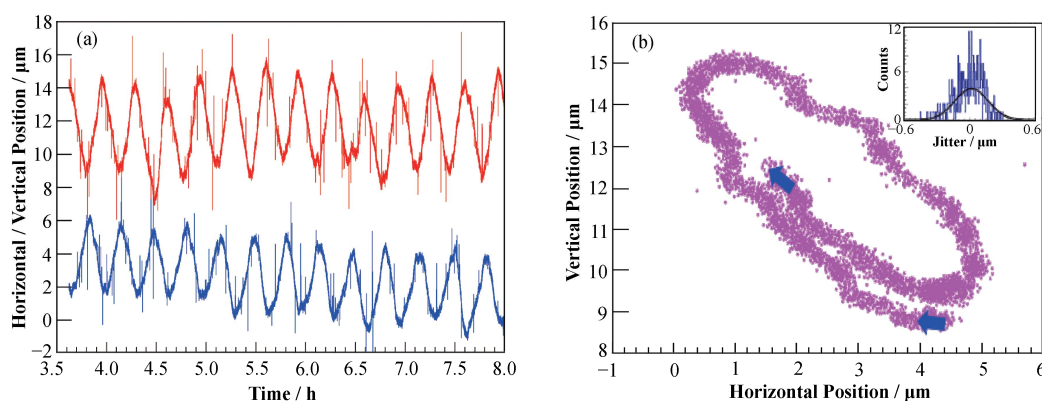


图 5 穿透型金刚石位置灵敏探测器观测到的上海光源生物大分子结构晶体学束线光束的水平(上方曲线)和垂直(下方曲线)方向的运动轨迹(a)和探测器得到的光束二维运动轨迹(b)

Fig.5 Time spectra of the horizontal position (up) and vertical position (down) obtained by the detector at the BL17U1 of SSRF (a), two dimension position display for the beam orbits (b).

4 结语

金刚石位置灵敏探测器具有透射率较高、灵敏面积大、信/噪比好、响应速度非常快、占空小、兼容超高真空系统的高温烘烤和耐辐射性能好等诸多特点, 是目前同步辐射装置和以后的第四代更高亮度自由电子激光光源的必然选择。我们所研制的一套穿透型金刚石面型位置灵敏探测器就是依据这些未来的需求而展开的。在上海光源生物大分子结构晶体学束线(BL17U1)上对其性能进行了测定。测量

数据表明在整块探测器($2.5\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$)均具有极好的线性响应, 探测器的信/噪比(S/N) $>5\times 10^3$, 位置分辨能力为 $\sigma=(136\pm 11)\text{ nm}$, 光强的测量精度和线性度均好于 0.1% , 能满足第三代同步辐射和第四代光源(自由电子激光)束线的光强、光斑的位置及其运动轨迹的监测。利用该 BPM 给出的测量数据, 可以实时地检测光斑位置的稳定性, 提供束线诊断必不可少的测量数据, 并为相关的束线位置反馈发展提供基础。

参考文献

- 李明, 石泓, 董淑强, 等. 双丝型同步辐射光束位置监测器的参数设计[J]. 核技术, 2009, **32**(6): 401–404
LI Ming, SHI Hong, DONG Shuqiang, *et al.* Parametric design of a double-wire type PBPM for a synchrotron radiation facility[J]. Nuclear Techniques, 2009, **32**(6): 401–404
- 赵佳, 崔明启, 赵屹东, 等. BSRF-3B3 束流位置监测系统的研制[J]. 光电工程, 2008, **35**(6): 141–144
ZHAO Jia, CUI Mingqi, ZHAO Yidong, *et al.* Developing XBPM system for BSRF-3B3 beamline[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, **35**(6): 141–144
- Arndt U W, Kyte M P. Position-sensitive ionization chambers in the alignment of X-ray tubes and diffractometers[J]. Journal of Applied Crystallography, 1999, **32**(5): 1024–1025. DOI: 10.1107/s0021889899008171
- 朱静, 陶世兴, 汪启胜, 等. 小型位置灵敏电离室的设计[J]. 核电子学与探测技术, 2010, **30**(4): 490–494
ZHU Jing, TAO Shixing, WANG Qisheng, *et al.* Design of a small type position-sensitive ionization chamber[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, **30**(4): 490–494
- 姜山, 蒋菰生, 郭宏. 一台锯齿形阳极位置灵敏电离室[J]. 核电子学与探测技术, 1996, **16**(5): 374–376
JIANG Shan, JIANG Songsheng, GUO Hong. A sawtooth anodes position sensitive ionization chamber[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1996, **16**(5): 374–376
- Changbum Kim, Jong Chel Yoon, Seung-nam Kim, *et al.* Photon-beam-position monitor in the PLS diagnostic beamline[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2010, **56**(6): 1981–1984. DOI: 10.3938/jkps.56.1981
- Chen R, Ueng T S, Hsiung G Y, *et al.* A synchrotron radiation beam-position monitor at the Taiwan light source[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 1998, **5**(3): 621–623. DOI: 10.1107/s0909049597018207
- Silfhout G R V, Manolopoulos S, Kyle 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. DOI: 10.1016/j.sna.2006.03.012
- Alkire R W, Rosenbaum G, Evans G. Design of a vacuum-compatible high-precision monochromatic beam-position monitor for use with synchrotron radiation from 5 to 25 keV[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2006, **7**(2): 61–68. DOI: 10.1107/s090904959901568x
- Kyle N R, Decanniere K, van Silfhout G R. A transparent two-dimensional *in situ* beam position and profile monitor for synchrotron X-ray beamlines[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2005, **12**(6): 800–806. DOI: 10.1107/s0909049505031250
- Marques S R, Cardoso F H, Grizolli W C, *et al.* Design and commissioning of a quadrant BPM for the LNLS beamlines[R]. Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy, 2008
- Henry J, Livingstone J. Thin-film amorphous silicon position-sensitive detectors[J]. Advanced Materials, 2001, **13**(12–13): 1022–1026. DOI: 10.1002/1521-4095(200107)13:12/13<1022::AID-ADMA1023>3.0.CO;2-I
- Fuchs M R, Holldack K, Bullough M, *et al.* Transmissive X-ray beam position monitors with submicron position- and submillisecond time resolution[J]. Review of Scientific Instruments, 2008, **79**(6): 063103. DOI: 10.1063/1.2938400
- Kenneya C J, Hasib J, Sherwood Parkerc, *et al.* Use of active-edge silicon detectors as X-ray beam monitors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007, **582**: 178–181
- Solar B, Graafsma H, Morse J, *et al.* Single crystal diamond beam position monitors with radiofrequency electronic readout[C]. AIP Conference Proceedings, 2010, **1234**: 846–850
- Muller E M, Smedley J, Bohon J, *et al.* Transmission-mode diamond white-beam position monitor at NSLS[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2012, **19**(3): 381–387. DOI: 10.1107/s0909049512005043
- Marinelli M, Milani E, Prestopino G, *et al.* X-ray beam monitor made by thin-film CVD single-crystal diamond[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2012, **19**(6): 1015–1020. DOI: 10.1107/s0909049512038186
- Morse J, Solar B, Graafsma H. Diamond X-ray beam-position monitoring using signal readout at the synchrotron radiofrequency[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2010, **17**(4): 456–464. DOI: 10.1107/s0909049510016547
- Zhou T Y, Ding W X, Gaowei M, *et al.* Pixelated transmission-mode diamond X-ray detector[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2015, **22**(6): 1396–1402. DOI: 10.1107/s1600577515014824
- Wang Q S, Yu F, Huang S, *et al.* The macromolecular crystallography beamline of SSRF[J]. Nuclear Science and Techniques, 2015, **26**(1): 010102. DOI: 10.13538/

- j.1001-8042/nst.26.010102
- 21 刘占军, 徐慧超, 龚培荣. Libera Photon 处理器在上海光源 XBPM 中的应用研究[J]. 核技术, 2014, 37(5): 050102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.050102
- LIU Zhanjun, XU Huichao, GONG Peirong. Research on application of Libera Photon processor for XBPM in SSRF[J]. Nuclear Techniques, 2014, 37(5): 050102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.050102
- 22 Slivka A, Orel P. Libera Photon technical specifications v1.01[M]. Solkan, Slovenia: Instrument Technologies, 2011: 15
- 23 Slivka A, Orel P. Libera Photon user manual v2.41[M]. Solkan, Slovenia: Instrument Technologies, 2011: 38