

基于波带片纳米聚焦装置的 快速扫描 X 射线荧光成像实验系统

兰旭颖^{1,2,3}, 张招红^{1,3}, 张继超^{1,3}, 李爱国^{1,3}, 王 劼^{1,3}

(1. 中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201204; 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 201210)

摘要: 在上海光源硬 X 射线微聚焦光束线站 BL15U1, 为提高波带片纳米聚焦装置的 X 射线荧光成像实验效率, 设计实现了一种快速扫描荧光成像实验装置。该装置包括运动控制系统、样品荧光探测系统和实验数据同步获取系统。运动控制系统设计了闭环反馈控制、样品台电机运动控制和扫描轨迹, 实现了快速扫描过程中样品的准确定位。样品荧光探测系统和实验数据同步获取系统实现了硬件同步触发计数器获取荧光计数, 保证了荧光成像的准确性。实验结果表明, 运动控制系统三角波形跟踪误差小于 20 nm, 满足光斑在样品处的重复定位精度小于光斑尺寸 1/10 的要求。用该系统获取了标准铜网的元素分布图像, 图像获取时间是“走停”扫描模式的 1/5, 验证了实验系统的可行性和高效性。

关键词: 同步辐射; 纳米聚焦装置; 快速扫描荧光成像

中图分类号: TL99

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2019)12-2478-07

doi: 10. 7538/yzk. 2018. youxian. 0878

Fast Scanning X-ray Fluorescence Imaging Experimental System Based on Zone Plate Nano-focusing Device

LAN Xuying^{1,2,3}, ZHANG Zhaohong^{1,3}, ZHANG Jichao^{1,3}, LI Aiguo^{1,3}, WANG Jie^{1,3}

(1. *Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China;*

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

3. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

Abstract: In the Shanghai Synchrotron Radiation Facility hard X-ray micro-focusing beamline station BL15U1, in order to improve the X-ray fluorescence imaging experiment efficiency of the zone plate nano-focusing device, a fast scanning fluorescence imaging experimental device was designed and implemented. The device includes a motion control system, a sample fluorescence detection system and an experimental data synchronization acquisition system. The motion control system was designed with closed-loop feedback control, sample stage motor motion control and scanning trajectory to achieve accurate positioning of samples during fast scanning. The sample fluorescence

收稿日期: 2018-12-05; 修回日期: 2019-01-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11805258, 11705270); 上海市青年科技英才扬帆计划资助项目(17YF1423600)

作者简介: 兰旭颖(1986—), 女, 辽宁鞍山人, 工程师, 硕士, 从事同步辐射光束线站的控制与数据采集系统研究

网络出版时间: 2019-04-30; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20190429.1204.002.html>

detection and experimental data synchronization acquisition systems were designed to realize the hardware synchronous trigger counter to obtain the fluorescence counts, which ensures the accuracy of fluorescence imaging. The experimental results show that the triangular waveform tracking error of the motion control system is less than 20 nm, which satisfies the requirement that the repeatability of the spot at the sample is less than 1/10 of the spot size. The element distribution image of the standard copper mesh is obtained by the system, and the image acquisition time is 1/5 of that in the “step-by-step” scanning mode, which confirms the feasibility and efficiency of the experimental system.

Key words: synchrotron radiation; nano-focusing device; fast scanning fluorescence imaging

同步辐射 X 射线荧光成像技术能准确获取样品中的元素分布,且具有高检测灵敏度和高空间分辨率,为生物、材料和环境等领域的科技人员研究元素微区分布提供了强有力的工具^[1-3]。上海光源 BL15U1 的波带片纳米聚焦装置最高可实现百纳米级空间分辨^[4],并已对用户开放^[5-7]。但此装置之前只实现了“走停”的扫描模式,该扫描模式不仅存在部分机时浪费^[8-9],而且在“走停”模式的长时间扫描过程中,一些不稳定因素如注束、束流轨道校正等可能会导致亚微米或纳米级空间分辨的成像扭曲^[10-12]。为此,需建立波带片纳米聚焦装置的快速扫描 X 射线荧光成像实验系统。

由于波带片纳米聚焦装置具有亚微米空间分辨,该装置对样品处光斑的定位要求是光斑在样品处的重复定位精度 \leq 光斑尺寸的 1/10 (以 600 nm 聚焦光斑为例,光斑在样品处的重复定位精度 \leq 60 nm 是可正常进行实验的基本要求),因此,在波带片纳米聚焦装置上建立快速扫描荧光成像实验系统的关键是运动控制系统重复定位精度需小于光斑尺寸的 1/10,且样品荧光计数同步获取系统能满足获取荧光计数的样品位置与荧光成像的像素点坐标严格一致,即保证荧光成像的准确性。

为在 BL15U1 的波带片纳米聚焦装置上建立快速扫描 X 射线荧光成像实验装置,设计该装置的运动控制系统、样品荧光探测系统和实验数据同步获取系统。运动控制系统基于 Delta-tau Power PMAC 控制器设计闭环反馈控制、样品台电机运动控制和扫描轨迹。样品荧光

探测和实验数据同步获取系统采用 Power PMAC 控制器的位置比较方法设计硬件同步触发计数器获取荧光计数,保证获取荧光计数的样品位置与荧光成像的像素点坐标的一致性。将设计的实验系统应用于 BL15U1 的波带片纳米聚焦装置,以验证实验系统的可行性和高效性。

1 实验设计

X 射线照射样品会产生含有样品元素特征电子能级结构的 X 射线荧光信号。利用微纳 X 射线聚焦光斑,连续逐点照射样品,同时使用荧光探测器收集荧光计数,可获得样品在选定空间范围内的元素空间分布,此即 X 射线扫描荧光成像方法。传统扫描方法通过控制水平和垂直方向的电机,每个像素点均先定位样品位置然后采集荧光信号,重复如此步骤扫描选定区域所有像素点完成实验过程。这样大量的时间将花费在电机启动、定位、停止、等待的过程中,极大降低实验效率。快速扫描 X 射线荧光方法,针对传统方法的缺点,采用水平方向电机连续不间断完整扫描 1 整行,水平 1 行扫描完成后垂直电机再换行,重复步骤完成整个扫描过程。这样可将传统方法行扫描浪费在电机启动、定位、停止、等待的时间大幅度降低。在水平方向行扫描过程中,控制器在选定的像素点位置产生触发信号同步获取 X 射线荧光探测器的计数,像素点位置的精确测量和触发是关键。

2 实验装置

波带片纳米聚焦装置的快速扫描 X 射线荧光成像实验系统如图 1 所示,主要包括样品

台、控制器、荧光探测器和计数器。样品台是 PI P-733, 2CD 纳米定位平台, 带有电容传感器, 用于检测样品台位置。控制器是 Delta-tau Power PMAC, 用于实现样品台的运动控制和实验数据同步获取, 该控制器用 16 位模数转换 ADC 卡读取电容传感器的测量信号, 用具有 18 位数模转换 DAC 的控制卡控制样品台运动并生成同步触发信号, 以触发计数器同步获取荧光计数。荧光探测器为单探头硅漂移固体荧光探测器, 电子学部分采用美国 XIA 公司的 DXP 系统。计数器采用具有 32 个通道的 Scaler SIS3820, 其 100 MHz 的采样频率可快速响应荧光计数的变化, 保证在快速扫描模式下不会丢失计数。

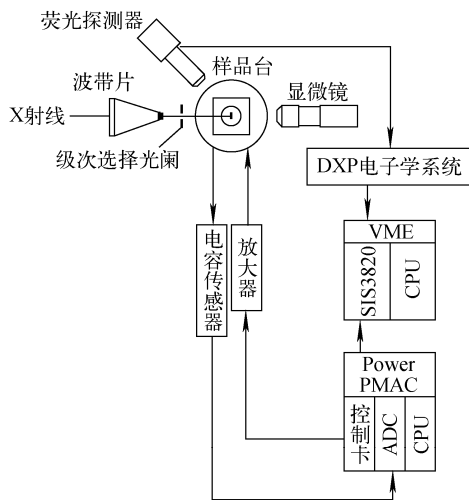


图 1 快速扫描实验装置示意图
Fig. 1 Schematic of fast scanning experimental device

快速扫描荧光成像实验系统的实现是样品在连续运动过程中, 控制器实时读取样品实际位置, 当样品每移动 1 个像素点步长时, 在该像素点位置产生 1 个触发信号, 以触发计数器同步获取探测器的荧光计数, 保证获取荧光计数的样品位置与荧光成像的像素点坐标严格一致, 即荧光成像的准确性。该系统实现的关键是样品台的精确运动控制和在连续扫描过程中荧光计数的同步获取。

3 运动控制系统

基于 Power PMAC 控制器设计运动控制

系统, 该系统包括闭环反馈控制、样品台电机运动控制和扫描轨迹, 以实现 X 射线荧光快速扫描过程中样品的精确定位。

3.1 闭环反馈控制

采用鲁棒控制算法旨在保证控制对象的跟踪性能和鲁棒性。考虑样品台对象 G 的镇定问题, 该对象具有标准化的左互质分解:

$$G = M^{-1}N \quad (1)$$

其中, M 和 N 为稳定的互质传递函数, 且存在稳定的 M^* 和 N^* 能满足如下的 Bezout 等式。

$$MM^* + NN^* = I \quad (2)$$

G 相应的摄动对象模型 G_p 可为:

$$G_p = (M + \Delta_M)^{-1}(N + \Delta_N) \quad (3)$$

其中, Δ_M 和 Δ_N 为稳定但未知的传递函数, 表示标称对象模型 G 的不确定性; I 为单位变量。鲁棒镇定的目标不仅要镇定标称模型 G , 还要镇定 1 族由下式定义的摄动对象模型:

$$G_p = \{(M + \Delta_M)^{-1}(N + \Delta_N) : \|\begin{bmatrix} \Delta_N & \Delta_M \end{bmatrix}\|_\infty < \epsilon\} \quad (4)$$

其中, ϵ 为稳定裕量, $\epsilon > 0$ 。最大化该稳定裕量即求解标准化互质因子对象的鲁棒镇定问题。

仅标称反馈系统稳定时, 图 2 所示的摄动反馈系统的稳定性是鲁棒的, 且:

$$\gamma = \left\| \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix} (I - GK)^{-1} M^{-1} \right\|_\infty \leq \frac{1}{\epsilon} \quad (5)$$

其中, γ 为由 ϕ 到 $\begin{bmatrix} \mu \\ y \end{bmatrix}$ 的 H_∞ 范数; K 为控制器。

γ 可达到的最小值以及相应的最大稳定裕量 ϵ_{\max} 为:

$$\gamma_{\min} = \epsilon_{\max}^{-1} = \{1 - \|\begin{bmatrix} N & M \end{bmatrix}\|_H^2\}^{-1/2} = (1 + \rho(XZ))^{1/2} \quad (6)$$

其中: $\begin{bmatrix} N & M \end{bmatrix}$ 为 N 和 M 构成的矩阵; $\|\cdot\|_H$ 为 Hankel 范数; ρ 为谱半径(最大特征值); 对于

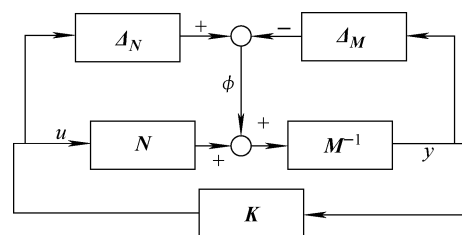


图 2 1 族摄动对象的鲁棒镇定
Fig. 2 Robust stabilization of one family of perturbed plants

G 的最小状态空间实现 $(A, B, C, D)^{[13]}$, X 和 Z 分别是如下代数 Riccati 方程的唯一正定解。

$$(A - BS^{-1}D^T C)Z + Z(A - BS^{-1}D^T C)^T - ZC^T R^{-1} CZ + BS^{-1} B^T = 0 \quad (7)$$

$$(A - BS^{-1}D^T C)^T X + X(A - BS^{-1}D^T C) - XBS^{-1} B^T X + C^T R^{-1} C = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} R &= I + DD^T \\ S &= I + D^T D \end{aligned} \quad (9)$$

对于指定的 $\gamma > \gamma_{\min}$, 保证 $\| \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix} (I - GK)^{-1} M^{-1} \|_{\infty} \leq \gamma$ 的控制器由下式^[14-15]给出:

$$K = \begin{bmatrix} A + BF + \gamma^2 (L^T)^{-1} \cdot & \gamma^2 (L^T)^{-1} ZC^T \\ ZC^T (C + DF) & -D^T \\ B^T X & \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$F = -S^{-1} (D^T C + B^T X) \quad (11)$$

$$L = (1 - \gamma^2) I + XZ \quad (12)$$

通过式(6)和两个 Riccati 方程可得出 γ_{\min} , 然后通过式(10)得到控制器 K 。控制器 K 对于控制系统在不确定性扰动作用下仍能维持预期的性能具有重要意义。式(5)中, $(I - GK)^{-1}$ 为该摄动反馈系统的灵敏度函数, 可见控制器 K 直接影响系统的灵敏度。所设计的控制器作用是减小灵敏度函数幅值, 提高系统鲁棒性, 使控制系统对输入的跟踪误差保持在很小的范围之内, 同时将干扰引起的输出维持在较低水平。

3.2 样品台电机运动控制

Power PMAC 控制器实现样品台电机运动控制, 需建立坐标系, 设定样品台电机的起始位置与坐标系原点对应, 并根据式(13)和(14)将样品台电机的运动方向映射到坐标轴上。设计轴定义为 #1 $\rightarrow X$ 和 #2 $\rightarrow Y$, 表示将样品台水平方向电机 #1 分配给坐标轴 X , 将垂直方向电机 #2 分配给坐标轴 Y 。执行动作命令, 电机 #1 和 #2 将根据坐标定义沿轴向运动。

$$\begin{bmatrix} \#1 \\ \#2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{A1} & k_{B1} \\ k_{A2} & k_{B2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\#i \rightarrow k_{Ai} X + k_{Bi} Y + d_i \quad i = 1, 2 \quad (14)$$

其中: d_i 为偏移量; k 为比例因子。

本系统中, 样品台采用绝对位置定位和线性运动模式。运动控制流程如图 3 所示。

3.3 扫描轨迹

设计样品台的三角波扫描驱动方式, 采用如下的三角波形函数。设计三角波扫描驱动轨迹是由于三角波是线性波形, 其位置点与时间点一一对应, 在三角波频率较低时, 图像不易畸变, 且易于编程实现。

$$f(t) = \begin{cases} A_1 + \frac{2A_1}{T_1}t & -\frac{T_1}{2} \leq t \leq 0 \\ A_1 - \frac{2A_1}{T_1}t & 0 \leq t \leq \frac{T_1}{2} \end{cases} \quad (15)$$

其中: T_1 为三角波周期; A_1 为三角波幅值。

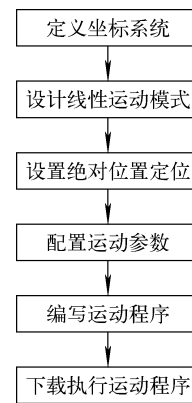


图 3 运动控制流程图

Fig. 3 Motion control flow chart

4 荧光探测系统和实验数据同步获取系统

荧光探测系统由荧光探测器探测荧光信号, 并通过电子学系统直接输出到 SIS3820 计数器。在数据获取前需先设置感兴趣区域, 当探测器探测到荧光信号时, 与此感兴趣区域范围匹配的所有荧光计数均会立即输出到 SIS3820 计数器。该方法仅获取每个感兴趣区域内的荧光数据, 而不是全谱数据, 因而提高了数据获取的效率。

实验数据同步获取系统是用于确保获取荧光计数的样品位置与荧光成像的像素点坐标严格一致, 采用控制器的位置比较方法, 硬件同步触发 SIS3820 计数器获取荧光计数, 该方法基于 3 个可设置的寄存器: 比较寄存器 CompA、比较寄存器 CompB、增量寄存器 CompAdd。分别设置比较寄存器 A 和 B 的初始值为 CompA0 和 CompB0, CompB0 为获取的第 1 个像素点

位置,并设置增量寄存器 CompAdd 的初始值为扫描步长值。当电容传感器检测的电机位置值等于 CompA0 时,控制器输出高电平信号,此时 CompA 会自动增加 1 个 CompAdd 增量,其值变为 CompA1。当电容传感器检测的电机位置值等于 CompB0 时,控制器输出低电平信号,此时 CompB 会自动增加 1 个 CompAdd 增量,其值变为 CompB1,该过程的自动增量式位置比较如图 4 所示^[16]。同时输出信号的下降沿同步触发 SIS3820 计数器。采用此方法在每个像素点处生成同步触发信号触发 SIS3820 计数器获取荧光计数,其流程如图 5 所示。此硬件比较触发的设计方法具有低延时高精度的优点,且触发信号的输出是由实测的样品位置与比较寄存器的值比较产生,保证了获取荧光计数的样品位置与荧光成像的像素点坐标的一致性,即荧光成像的准确性。

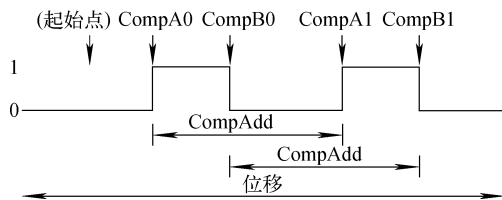


图 4 自动增量式位置比较波形图

Fig. 4 Position-comparison waveform with auto-increment

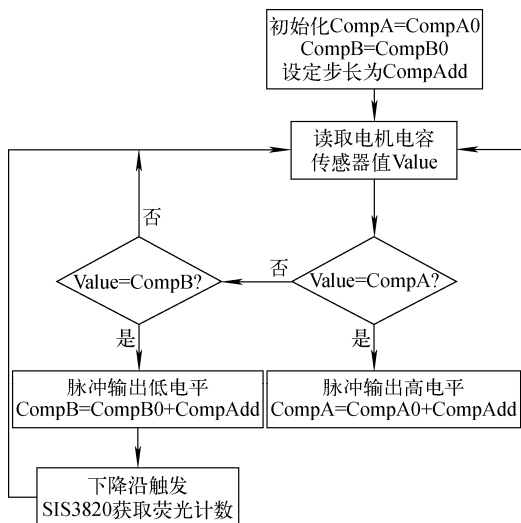


图 5 荧光计数同步获取流程图

Fig. 5 Fluorescence count synchronization acquisition flow chart

5 实验

5.1 运动控制系统实验

控制系统的阶跃响应如图 6 所示。参考输入信号的幅值为 $1 \mu\text{m}$ 。输入信号幅值若选择太小,系统响应会淹没在噪声信号中,无法明显观察到阶跃信号响应。输入信号幅值若选择太大,系统易进入非线性区,引起性能降低,或导致控制信号饱和。选择 $1 \mu\text{m}$ 幅值作为参考输入信号,输出阶跃响应具有较高的信噪比,且系统无控制信号饱和问题。另外,以 $1 \mu\text{m}$ 幅值作为参考输入信号,易于分析计算系统的动态特性参数。

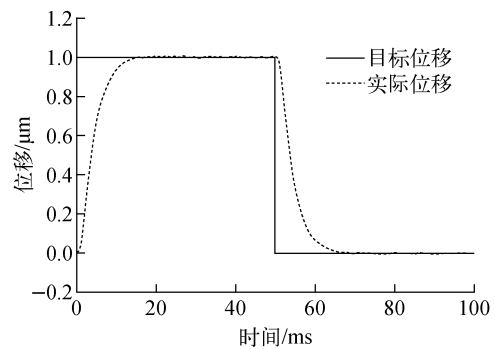


图 6 控制系统阶跃响应

Fig. 6 Step response of control system

控制系统的鲁棒性由灵敏度传递函数 S 和补灵敏度传递函数 T 表示。 S 和 T 的波特图分别如图 7a 和 b 所示,根据鲁棒性判断准则^[15], S 可表征扰动对输出的传递作用, S 最大峰值位于 678.32 rad/s 处,值为 1.21 dB ,小于 6 dB ,则输出对外部扰动一致衰减,系统对抗扰动的抗干扰能力较好,可获得较小的跟踪误差。补灵敏度传递函数 T 可表征输入信号对输出的影响以及系统对高频扰动的抑制, T 最大峰

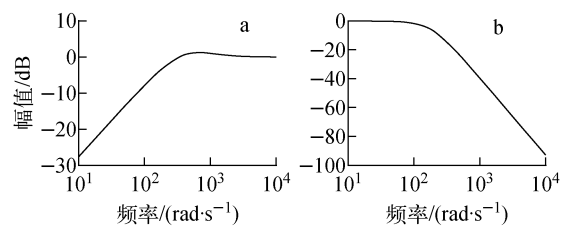


图 7 控制系统 S (a)和 T (b)的波特图

Fig. 7 Bode diagrams of S (a) and T (b) of control system

值位于 0 rad/s 处, 值为 0 , 小于 2 dB , 表明该控制系统能有效抑制输入的传感器噪声信号对输出的影响。此外, 从 T 的波特图可见, 在较高频率处, T 值快速衰减, 表明闭环控制系统对高频扰动具有良好的抑制作用。

控制系统的跟踪性能如图 8 所示。光斑大小 600 nm , 单点扫描时间 0.1 s , 样品台跟踪幅值为 $60 \mu\text{m}$ 、周期为 20 s 的三角波形(对于水平方向 $60 \mu\text{m}$ 行程, 600 nm 扫描步长, 单行共需扫描 100 个点, 每个点 0.1 s , 则单行扫描需 10 s , 三角波形 1 个周期对应于往返的两行扫描, 则设置三角波形周期为 20 s), 其跟踪误差小于 20 nm , 满足了样品重复定位精度小于光斑尺寸 $1/10$ 的要求。而在三角波形的转折点处运动轨迹的方向和速度均有较大的变化, 导致此处轨迹跟踪误差相对较大。控制系统的输出跟踪性能如图 8 所示, 图 8a 与 b 的时间点相对应, 取包含三角波形转折点的一段时间内样品台电机的跟踪误差(图 8b), 其误差较大处对应图 8a 中三角波形的转折点处, 最大误差约为 17.37 nm 。

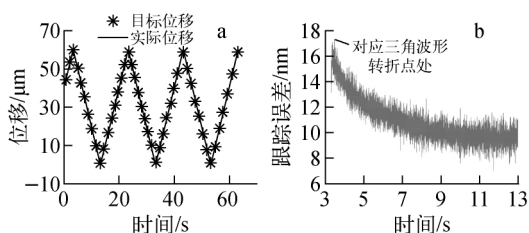


图 8 控制系统的输出跟踪轨迹(a)和样品台单行移动跟踪误差(b)

Fig. 8 Output tracking trajectory (a) and tracking error of sample stage moving in one line (b) of control system

5.2 快速扫描荧光成像实验

在 BL15U1 的波带片纳米聚焦装置上, 应用设计的快速扫描 X 射线荧光成像实验系统获取标准铜网(铜网尺寸为 2000 目/in , $1 \text{ in} = 2.54 \text{ cm}$)的元素分布图像, X 射线能量为 10 keV 。光斑扫描并微分和 Gauss 拟合的结果如图 9 所示, 其水平方向半高宽为 609 nm , 垂直方向半高宽为 593 nm , 设置扫描步长为 $600 \text{ nm} \times 600 \text{ nm}$, 即图像的像素点大小为 $600 \text{ nm} \times 600 \text{ nm}$ 。每个像素的扫描时间为 0.1 s , 铜网样品如图 10a 所

示(由后视显微镜获取)。

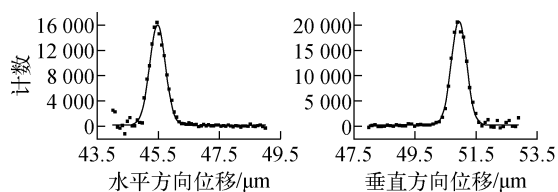


图 9 光斑水平方向和垂直方向尺寸

Fig. 9 Horizontal size and vertical size of spot

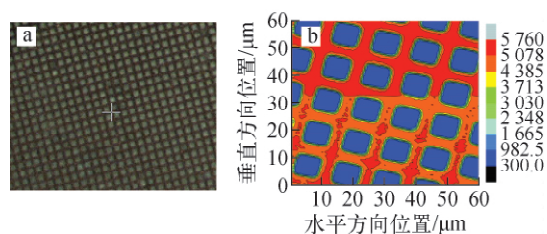


图 10 快速扫描荧光成像实验结果

Fig. 10 Result of fast scanning fluorescence imaging experiment

根据上述对快速扫描荧光成像实验系统的分析, 其运动控制系统具有良好的鲁棒性, 且满足样品重复定位精度小于光斑尺寸 $1/10$ 的要求。此外, X 射线荧光计数的获取由硬件同步触发计数器实现, 保证了荧光成像的质量。实验所获得的铜网元素分布图像如图 10b 所示。

与波带片纳米聚焦装置之前采用的“走停”扫描模式相比, 相同的实验条件下, “走停”扫描模式获取该荧光图像需 5000 s , 而快扫模式仅需 1000 s , 快扫模式图像获取时间是“走停”扫描模式的 $1/5$, 提高了实验效率。

6 结论

在上海光源 BL15U1 的波带片纳米聚焦装置上首次建立快速扫描荧光成像实验装置。该装置包括运动控制系统、样品荧光探测系统和实验数据同步获取系统。其运动控制系统具有良好的鲁棒性, 三角波形跟踪误差小于 20 nm , 满足样品重复定位精度小于光斑尺寸 $1/10$ 的要求。样品荧光探测和实验数据同步获取系统采用硬件比较触发的方法, 保证了获取荧光计数的样品位置与荧光成像的像素点坐标严格一致。应用此快速扫描 X 射线荧光成

像实验系统获得了标准铜网的元素分布图像,验证了所设计的快速扫描系统的可行性。此外,与“走停”扫描模式相比,所设计的快速扫描荧光成像实验系统提高了实验效率,使用户能在同步辐射装置有限的机时内获取更多的实验结果。

参考文献:

- [1] KLEEFELD A, GYPSER S, HERPPICH W B, et al. Identification of spatial pattern of photosynthesis hotspots in moss- and lichen-dominated biological soil crusts by combining chlorophyll fluorescence imaging and multispectral BNDVI images[J]. *Pedobiologia*, 2018, 68: 1-11.
- [2] WOZNIAK M, POLAP D, KOSMIDER L, et al. Automated fluorescence microscopy image analysis of pseudomonas aeruginosa bacteria in alive and dead stadium[J]. *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 2018, 67: 100-110.
- [3] RAUWOLF M, TURYANSKAYA A, ROSCHGER A, et al. Synchrotron radiation micro X-ray fluorescence spectroscopy of thin structures in bone samples: Comparison of confocal and color X-ray camera setups[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2017, 24: 307-311.
- [4] ZHANG Lili, YAN Shuai, JIANG Sheng, et al. Hard X-ray micro-focusing beamline at SSRF[J]. *Nuclear Science and Technology*, 2015, 26: 060101.
- [5] ZENG Leyong, PAN Yuanwei, ZOU Ruifen, et al. 808 nm-excited upconversion nanoprobes with low heating effect for targeted magnetic resonance imaging and high-efficacy photodynamic therapy in HER2-overexpressed breast cancer[J]. *Biomaterials*, 2016, 103: 116-127.
- [6] REN Wenzhi, ZUBAIRLQBAL M, ZENG Leyong, et al. Black TiO₂ based core-shell nanocomposites as doxorubicin carriers for thermal imaging guided synergistic therapy of breast cancer[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(31): 11 195-11 204.
- [7] PAN Yuanwei, ZHANG Linge, ZENG Leyong, et al. Gd-based upconversion nanocarriers with yolk-shell structure for dual-modal imaging and enhanced chemotherapy to overcome multidrug resistance in breast cancer[J]. *Nanoscale*, 2016, 8(2): 878-888.
- [8] 闫芬,李爱国,杨科,等. 基于 EPICS 的硬 X 微聚焦实验站数据采集系统[J]. *核技术*, 2009, 32(11):801-805.
- YAN Fen, LI Aiguo, YANG Ke, et al. EPICS-based data acquisition system of hard X-ray microfocus station[J]. *Nuclear Techniques*, 2009, 32(11): 801-805(in Chinese).
- [9] synApps; sscan[EB/OL]. [2014-09]. <https://epics.anl.gov/bcda/synApps/sscan/sscan.html>.
- [10] NAZARETSKI E, YAN H, LAUER K, et al. Design and performance of an X-ray scanning microscope at the hard X-ray nanoprobe beamline of NSLS-II [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2017, 24: 1 113-1 119.
- [11] CHEN S, DENG J, YUAN Y, et al. The Bio-nanoprobe: Hard X-ray fluorescence nanoprobe with cryogenic capabilities[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2014, 21: 66-75.
- [12] DENG Junjing, PREISSNER C A, ROEHRIG C, et al. The velociprobe: A fast hard x-ray nanoprobe for ptychographic imaging[J]. *SPIE X-ray nanoimaging: Instruments and Methods III*, 2017: 103890M.
- [13] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京:科学出版社, 2018.
- [14] 社拉德. 鲁棒控制理论教程[M]. 北京:世界图书出版公司,2014.
- [15] 西格德·斯科格斯特德,伊恩·波斯尔思韦特. 多变量反馈控制:分析与设计[M]. 韩崇昭,张爱民,刘晓风,等译. 西安:西安交通大学出版社, 2011.
- [16] Delta tau's Power PMAC [EB/OL]. [2017]. http://www.deltatau.com/DT_PowerPMAC/PowerPMACHome.aspx.