

多功能扫描质子核探针信号探测和数据获取系统*

包良满¹, 雷前涛¹, 刘江峰², 李晓林¹, 李 燕¹

(1. 中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201800;

2. 信阳师范学院 物理电子工程学院, 河南 信阳 464000)

摘 要: 为了在一次扫描质子核探针实验中能获取多种物理信息, 研制了多功能信号探测与数据获取系统。系统由组合探测器、多站多参量数据采集与束流扫描、样品台控制与显微观测三个子系统组成。组合探测器包括了 Si(Li)X 射线探测器, 高纯 Ge γ 射线探测器, 以及 Au(Si)面垒带电粒子探测器, 可完成多种物理参数的同时获取。系统的核心数据采集与束流扫描系统基于 NI 公司的 PXI-7852R 数据采集卡和 LabVIEW 软件平台, 具备了多个物理信号采集、多能谱显示以及束流扫描和二维成像等功能。六轴高精度真空样品台由计算机控制, 可实现显微图像对样品的定位及对扫描区域的可视化选择。初步实验验证了该系统的可靠性与稳定性。

关键词: 扫描质子核探针; 信号探测; 数据获取

中图分类号: TL822.6

文献标志码: A

doi:10.11884/HPLPB201527.114005

1991 年, 在中国科学院上海应用物理研究所的 4 MeV 静电加速器上, 建成了我国首台扫描质子核探针(也称微探针), 该探针主要使用质子激发 X 射线分析(PIXE), 数据获取系统使用了 ND76 多参量多道分析器和 MicroVAX-II 计算机^[1]。1996 年对数据获取系统进行了升级, 使用了 VME 计算机和 SUN 工作站^[2], 可进行 PIXE 分析和卢瑟福背散射分析(RBS)。由于设备限制, 这台核探针功能单一。国外的扫描质子核探针^[3-6], 大多能综合使用 PIXE, RBS、弹性反冲分析(ERD)、质子弹性散射(PESA)、质子激发 γ 射线分析(PIGE)、扫描透射离子束成像(STIM)、核反应分析(NRA)等多种核效应, 一次分析能同时获得样品微区元素成分、结构等多种信息。因此, 为了在一次实验中能进行多种离子束分析, 就需要相应的探测器系统。同时, 为了提高定量分析的精度, 对束流的扫描控制和物理信号测量的同步性也提出了要求^[7]。为此, 需要研制新的多功能信号探测与数据获取系统。

本文所介绍的新的信号探测与数据获取系统, 由组合探测器、数据采集与束流扫描、样品台控制与显微观测三个子系统组成。探测器包括 X 射线、 γ 射线、离子探测器, 能完成多种物理信号探测。国外微探针的数据采集系统采用了多种不同技术^[6]。如采用常规的核电子学仪器和插件, 则价格昂贵, 花费时间长, 要求离子束实验者有较深的电子学知识。现场可编程门阵列(FPGA)器件的发展和商业化应用, 如美国国家仪器公司 NI 生产的以 FPGA 器件作为数据采集控制核心的数据模块, 在数据获取系统的应用上降低了开发成本和周期^[7-10]。由于 FPGA 集采样控制、处理、缓存、传输控制、通讯于一个芯片内, 编程配置灵活, 适用于对时序有严格要求的高速多通道数据采集系统。考虑到扫描质子核探针实验对多通道、高速和大容量数据采集的要求, 以及后续的硬件、软件维护和升级的要求, 多站多参量的数据采集系统采用了基于 PXI 扩展总线的具有符合功能的 NI 公司开发的 PXI-7852R 数据采集模块实现各路探测信号的同时采集, 以事件方式记录数据, 由软件系统实现能谱及多参量事件文件的组装、存放和检索, 同时对数据进行实时在线显示。数据处理程序与束流扫描程序集成, 实现对扫描区域的可视化选择。六轴高精度真空样品台由计算机控制, 通过程序间的参数传递完成显微图像对样品的定位。

1 系统架构

上海应用物理研究所扫描质子微探针系统构成可参考文献^[12]和^[13]。新的核探针信号探测和数据获取系统如图 1 所示。

1.1 探测器系统

信号探测系统包括 6 路探测器: 2 个 Si(Li)X 射线探测器、2 个 Au(Si)面垒带电粒子探测器、1 个高纯锗(HPGe) γ 射线探测器、1 个 Si-PIN 带电粒子探测器, 布局如图 2 所示。超薄窗(UTW)PGTLS30135 型 Si

* 收稿日期: 2015-07-02; 修订日期: 2015-08-17

基金项目: 中国科学院科研装备研制项目(YZ200937); 上海市科研计划项目(14ZR1448300)

作者简介: 包良满(1979—), 男, 博士, 主要从事核技术应用研究; baoliangman@sinap.ac.cn.

通信作者: 刘江峰(1970—), 男, 博士, 主要从事核技术应用研究; ljiaf@gmail.com.

(Li) X 射线探测器使用 $0.3 \mu\text{m}$ 的 Prism 膜做隔离窗, 晶体有效面积 30 mm^2 , 探测器能量分辨率 136 eV (FWHM)@ 5.9 keV , 由 ORTEC 659 型高压供给 -800 V 高压, 使用 ORTEC 572A 主放大器和 ORTEC 7070 ADC, 主要用来探测低能 X 射线($0.15 \sim 6.0 \text{ keV}$), 可探测 C 以上的元素。铍窗 PGT LS30135 型薄窗 Si(Li) X 射线探测器使用 $8 \mu\text{m}$ 的铍窗, 晶体有效面积 30 mm^2 , 可探测 Na 以上的元素, 探测器能量分辨率 144 eV (FWHM)@ 5.9 keV , 由 ORTEC 659 型高压供给 -600 V 高压, 使用 ORTEC 671 主放大器和 ORTEC 7070 ADC, 主要用来探测中高能 X 射线($1.7 \sim 18 \text{ keV}$), 可探测 Si 以上的元素。2 个 Si(Li) 探测器用于 PIXE 分析。ORTEC GEM40P4-76 型 HPGe γ 射线探测器晶体直径 63.8 mm , 能量分辨率 1.8 keV (FWHM)@ ^{60}Co 1.33 MeV , 由 ORTEC 659 型高压供给 $+2700 \text{ V}$ 高压, 使用 ORTEC 671 主放大器和 ORTEC 7072 ADC。HPGe γ 射线探测器用于 PIGE 分析。Au(Si) 面垒探测器为上海应用物理研究所生产, 探测器直径 10 mm , 能量分辨率 11.3 keV @ ^{238}Pu 5.499 MeV , 由 ORTEC710 型高压供给 $+50 \text{ V}$ 高压, 使用 ORTEC 142A 前置放大器和 671 主放大器, 以及 ORTEC 7072 ADC。Au(Si) 面垒探测器可用于 RBS, ERD, STIM 和 NRA 分析。探测器分辨率测量能谱如图 3 所示。

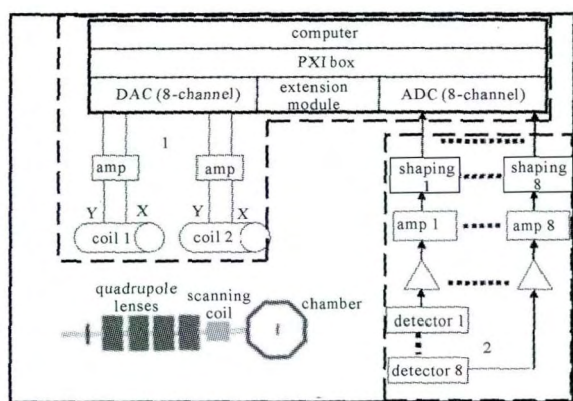


Fig. 1 Schematic diagram of new signal detection and data acquisition system for SINAP's scanning proton microprobe

图 1 新一代多功能扫描质子核探针信号探测和数据获取系统组成

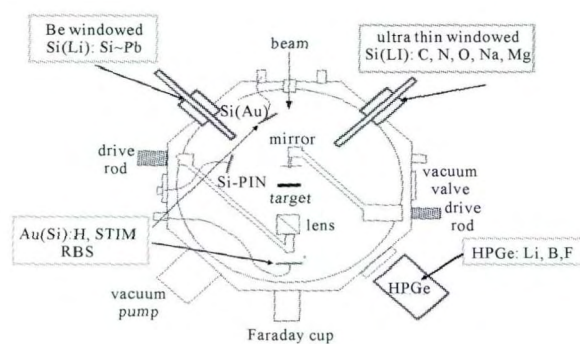


Fig. 2 Schematic diagram of the multiple detectors

图 2 探测器系统布局示意图

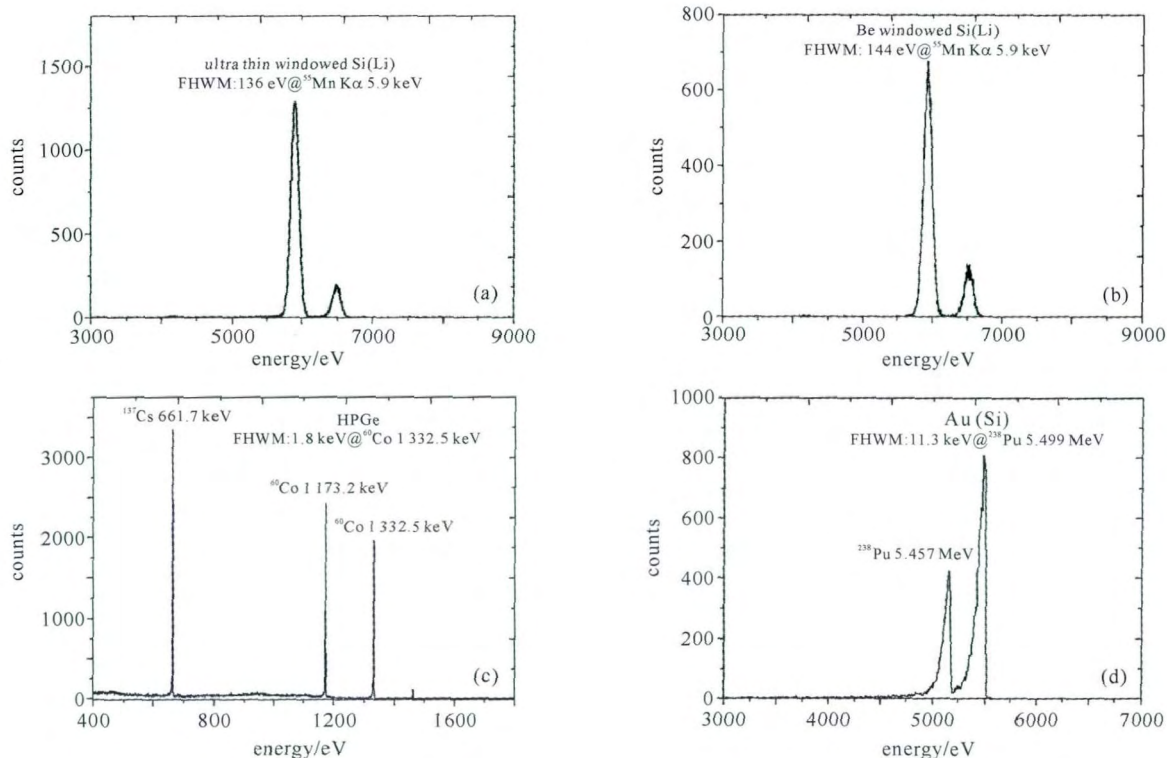


Fig. 3 Energy resolutions of the multiple detectors

图 3 探测器能量分辨率

1.2 数据采集与束流扫描系统

多站多参量数据采集与束流扫描系统采用 4LB-I 型扫描质子核探针数据获取系统,是新一代的基于 PC 的数据采集系统。系统主要包括 PXI 机箱、计算机、NI PXI-7852R 数据采集卡、数据分配箱等。主控器是运行在 PXI 机箱上的 PXI-8106 插件式计算机,其 CPU 为酷睿 2 代 T7400,主频 2.2 GHz,操作系统为 Windows XP。系统的核心是 PXI-7852R 数据采集卡,采集卡具有 8 路模拟输入和输出,96 条数字线,3 路直接存储器访问(DMA)通道,配置了高性能 Virtex-5 LX50 FPGA 芯片,可通过 NI LabVIEW FPGA 软件进行图形化编程。PXI-7852R 模块直接接收 3 路主放输出的模拟信号、5 路 ADC 输出的数字信号以及多路用于检测系统状态的模拟和数字信号。同时,PXI-7852R 的 FPGA 电路产生控制束流扫描的 X,Y 两路三角波信号,经 DAC0、DAC1 输出至三角波驱动功放,扫描频率最高达 5000 Hz。数据采集系统如图 4 所示。在扫描获取模式,主放或 ADC 输出的事件信号触发 PXI-7852R 进行脉冲幅度分析、扫描位置信号的事件组装,并将数据送入 FIFO (first in first out) 存储器,等待 PXI-8106 读取。在定点分析模式,系统不输出扫描信号,但仍保存事件格式文件。PXI-7852R 卡的 connector 0 为模拟数字混合 I/O 接口,connector 1 和 connector 2 为纯数字接口,所有信号连接至数据分配箱和基于 NIM 机箱插件的 ADC 和主放及扫描功放通讯,实现脉冲幅度信号的采集和束流扫描。通过三个 FIFO 存储器,数据从核心模块读入读出,其中一个 FIFO 存储器(FIFO-IN)和扫描模式联合。FIFO-OUT 1 存储器专用于从 ADC 传输脉冲幅度数据。数据仲裁逻辑管理来自单个的 ADC 环路数据包,避免两个或多个环路同时访问 FIFO。FIFO-OUT2 存储器,仅用于成像,使用了模拟信号、数字脉冲和 ADC 死时间。

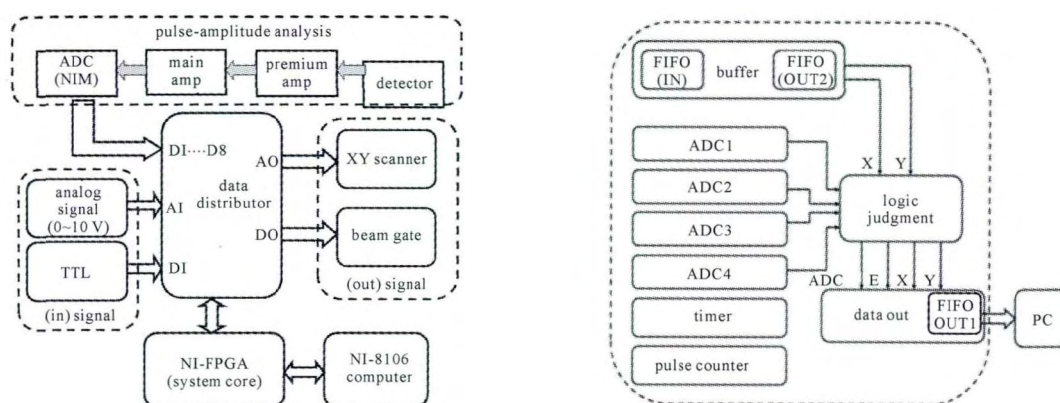


Fig. 4 Schematic diagram of the data acquisition and beam scanning system

图 4 数据采集及束流扫描系统框图

扫描质子束激发样品产生的物理信号及坐标数据从数字扫描输出数据获取,扫描信号由 PXI-7852R 卡上的 DAC 产生,在扫描质子束激发样品产生的物理信号触发数据采集系统后,由卡上 FPGA 电路计算出物理脉冲信号产生到触发时间后,选择锁存扫描队列中的位置数据,并和该物理信号数据打包后由存储器直接访问方式送给上位计算机。合理分配 PXI-7852R 的 I/O 线,并做好地线的连接和位置分布,可以减小 ADC 到数据采集卡的数字信号传输干扰及误码率;同时,在满足需要的情况下适当降低传输速度以保证数据的完整性。束流图形化扫描基于 PC 机的 ISA 总线,12 位的 D/A 芯片对数字信号进行数模转换后,输出 0~10 V 的电压信号到电压输入-电流输出的功率放大器,转换为±2.5 A(正反向)的电流信号驱动扫描线圈,通过偏转线圈磁场对质子束的操纵,实现质子束流任意图形扫描。

基于 NI-PXI8106 计算机的 WinXP 系统,利用 LabVIEW 程序编写了系统软件。实现了数据由 PXI-7852R 采集卡到计算机间的数据传输、能谱和二维元素分布强度图显示以及数据的存储等相关处理。利用软件,可实现扫描参数设置,采集能谱、显示、能量刻度、寻峰、图像显示、缩放、感兴趣区域选择分析、三维图像处理等。测试表明,每通道采集速度可达 20 000 cps。

1.3 样品台控制与显微观测

为了开展 STIM-CT 实验^[14],配置了可装在靶室顶部的由英国 Vacuum Generators(VG)公司生产的 HPT 六轴精密操控台(图 5)。样品台垂直安装在靶室上,其中 X,Y 和 Z 三个平移轴调节精度 1 μm,两个倾斜度和旋转调节精度为 0.01°;倾斜度调节为手动,平移轴由步进电机驱动调节。置于靶室之外的长焦显微镜,

与束流成 45° 的方向通过玻璃窗对真空室内的样品进行观察。采用单筒长焦显微镜, 显微镜配备标准的 C-MOUNT 接口, 连接 CCD 和计算机, 放大倍数为 200 倍。显微图像导航系统从显微图像中获取束斑和样品的位置, 计算出鼠标点取位置与目标位置间对应的距离, 利用 AT 指令集开发的步进电机驱动程序, 输出相应的步数驱动样品移动, 实现显微图像导航的样品定位。



Fig. 5 Photo and schematic diagram of six axis manipulator

图 5 六轴样品台照片和组成结构示意图

2 实 验

2.1 能谱测量

利用能量 3 MeV, 流强约 150 pA 的质子束, 对 Micromatter 标准物质 NaCl 膜、Pb 膜进行了 PIXE 测试, 对 mylar 膜进行了 PESA 测试, 对采集在特氟龙膜上的沙尘暴颗粒物进行了 PIGE 分析, 典型能谱如图 6 所示。UTW Si(Li) 探测器主要用来探测 C~Fe 之间的元素, Be 窗 Si(Li) 探测器可探测 Si 到 U 之间的元素, PESA 主要测量样品中的 H, PIGE 主要用来分析原子序数小于 S 的轻元素。可见, 组合使用多探测器, 可以实现全元素分析。

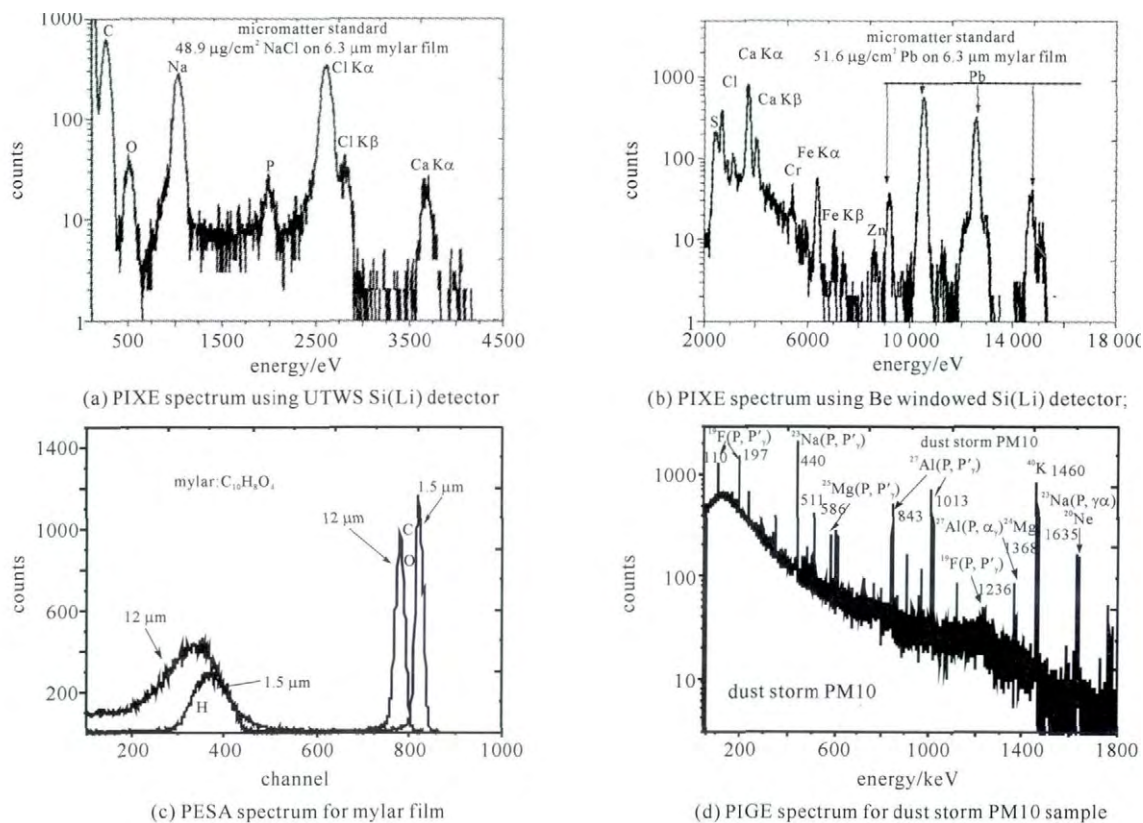


Fig. 6 Typical spectra

图 6 典型能谱图

2.2 扫描测试

用束斑直径约 $5\ \mu\text{m}$ 、流强 $250\ \text{pA}$ 的质子束,对 200 目 Ni 网进行了 micro-PIXE 扫描分析,获取 Ni 元素的二维分布图(图 7),由此计算质子束最大扫描范围。根据 Ni 网孔距离和 Ni 线宽,计算得到 X 方向最大扫描范围分别为 $5194\ \mu\text{m}$,Y 方向最大扫描范围为 $5448\ \mu\text{m}$ 。

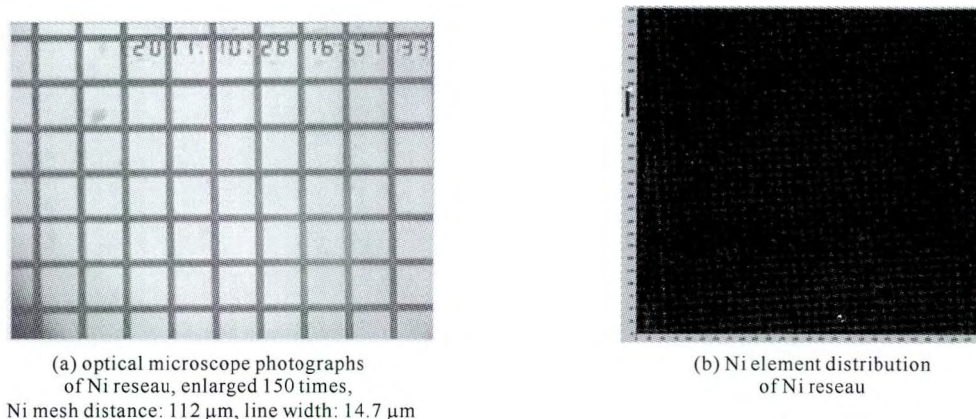


Fig. 7 Micro-PIXE results of Ni reseau

图 7 Ni 网样品 micro-PIXE 扫描分析

新的数据采用了通用的 NI 公司的元器件、模块化设计,设备维护更新容易。系统软件容易兼容新的 NI 公司数据卡。新的数据获取系统的建成,扩大了原有核探针的功能,可进行全元素分析、成像等工作,提高了核分析技术水平,为多学科领域研究提供一个技术平台。

3 结 论

新一代多功能核探针信号探测和数据获取系统由组合探测器、数据采集与束流扫描和样品台控制与显微观测三个子系统组成。探测器系统由常规 Si(Li)、超薄窗 Si(Li), Au(Si) 和 HPGe 等探测器组成,各探测器能量分辨率分别为 $0.144, 0.136, 11.3, 1.8\ \text{keV}$ 。数据采集和束流扫描系统采用基于 PXI 扩展总线的 PXI-7852R 模块实现各路探测信号的同时采集以及束流扫描,软件系统实现了能谱及多参量事件文件的组装、存放和检索,同时对数据进行实时在线显示。六轴高精度真空样品台由计算机控制,其平移调节精度为 $1\ \mu\text{m}$,旋转精度为 0.01° 。利用显微观测系统,通过程序间的参数传递完成显微图像对样品的导航定位。初步实验证实了系统的稳定性和可靠性。

参考文献:

- [1] Zhu Jieqing, Li Minqian, Gu Yingmei, et al. A multiparameter data system for the Shanghai nuclear microprobe[J]. *Nucl Instr and Meth B*, 1991, **54**(1/2/3): 42-46.
- [2] 王基庆, 郭盘林, 李铭尧, 等. 用于核子微探针的多站多参量数据系统[J]. *核电子学与探测技术*, 1999, **19**(6): 433-436. (Wang Jiqing, Guo Panlin, Li Mingyao, et al. Multi-stations and multi-parameters data system for nuclear microprobe. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 1999, **19**(6): 433-436)
- [3] Watt F. The nuclear microprobe: A unique instrument[J]. *Nucl Instr and Meth B*, 1997, **130**(1/4): 1-8.
- [4] Giuntini L, Massi M, Calus S, et al. The set-up for forward scattered particle detection at the external microbeam facility of the INFN-LA-BEC laboratory in Florence[J]. *Nucl Instr and Meth B*, 2015, **348**(1): 8-13.
- [5] Niekraszewicz L A B, de Souza C T, Stori E M. The role of micro-NRA and micro-PIXE in carbon mapping of organic tissues[J]. *Nucl Instr and Meth B*, 2015, **348**(1): 160-164.
- [6] Ryan C G. PIXE and the nuclear microprobe: Tools for quantitative imaging of complex natural materials[J]. *Nucl Instr and Meth B*, 2011, **269**(20): 2151-2162.
- [7] Ferrand P. GPScan. VI: A general-purpose LabVIEW program for scanning imaging or any application requiring synchronous analog voltage generation and data acquisition[J]. *Computer Physics Communications*, 2015, **192**: 342-347.
- [8] Bettiol A A, Udalagama C, Watt F. A new data acquisition and imaging system for nuclear microscopy based on a field programmable gate array card[J]. *Nucl Instr and Meth B*, 2009, **267**: 2069-2072.
- [9] Laird J S, Szymanski R, Ryan C G, et al. A Labview based FPGA data acquisition with integrated stage and beam transport control[J]. *Nucl Instr and Meth B*, 2013, **306**: 71-75.

- [10] Morse D H, Antolak A J, Bench G S, et al. A flexible LabVIEW-based data acquisition and analysis system for scanning microscopy[J]. *Nucl Instr and Meth B*, 1999, **158**: 146-152.
- [11] Du Guanghua, Guo Jinlong, Wu Ruqun, et al. The data acquisition and beam control system at the IMP microbeam facility[J]. *Nucl Instr and Meth B*, 2013, **306**(1): 29-34.
- [12] 刘江峰,岳伟生,万天敏,等. 扫描质子微探针扫描系统优化与分辨率测量[J]. *核技术*, 2007, **30**(1): 21-26. (Liu Jiangfeng, Yue Weisheng, Wan Tianmin, et al. Improvement of scanning coil system and resolution test of scanning proton microscope. *Nuclear Techniques*, 2007, **30**(1): 21-26)
- [13] 雷前涛,刘江峰,包良满,等. 扫描质子微探针质子束刻写[J]. *强激光与粒子束*, 2012, **24**(7):1603-1607. (Lei Qiantao, Liu Jiangfeng, Bao Liangman, et al. The studying of PBW (proton beam writing) on SINAP's SPM. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(7): 1603-1607)
- [14] 刘江峰,包良满,岳伟生,等. 扫描透射离子显微成像系统的建立和实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(2): 313-318. (Liu Jiangfeng, Bao Liangman, Yue Weisheng, et al. Scanning transmission ion microscopy in Shanghai scanning proton microprobe system. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(2):313-318)

Multifunction signal detection and data acquisition system for SINAP's scanning proton microprobe

Bao Liangman¹, Lei Qiantao¹, Liu Jiangfeng², Li Xiaolin¹, Li yan¹

(1. *Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*;

2. *College of Physics & Electronic Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China*)

Abstract: For acquiring multiple physical parameters in one experiment on the SINAP scanning proton microprobe(SPM), the new multifunction signal detection and data acquisition system was developed. The system consists of multiple detectors, multi-stations and multi-parameters data acquisition and beam scanning system, manipulator control and microscope system. Multiple detectors include two Si(Li) detectors for X-rays, a HPGe detector for gamma-rays, and Au(Si) surface barrier detectors for charged particles. The core data acquisition system, named 4LB- I is based on National Instruments PXI-7852R card and Labview FPGA module. It performs the functions of multi-channel data acquisition, display, beam scanning and two-dimensional images, which can obtain multiple physical parameters simultaneously in one measurement. Six axis vacuum manipulator is computer-controlled for sample positioning and video sample imaging. The initial experiment results show that the system is a powerful tool with good stability and reliability.

Key words: scanning proton microprobe; signal detection; data acquisition

PACS: 29.85. Ca; 29.85. Fj; 29.20. Ba