

基于PILATUS探测器的von Hamos构型 X射线发射谱谱仪及数据获取

顾颂琦^{1,2,3} 梅丙宝² 姜 政^{1,2} 黄宇营^{1,2}

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院上海高等研究院 上海 201204)

3(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 高能分辨X射线发射谱(X-ray Emission Spectroscopy, XES)比常规X射线吸收精细结构谱(X-ray Absorption Fine Structure, XAFS)具有更高的能量分辨率,是探究物质精细电子结构的有力工具。PILATUS探测器是一种没有暗电流和读出噪声的单光子计数探测器,基于该探测器,在上海光源BL14W1线站搭建了一套von Hamos构型XES谱仪及数据获取系统,能量分辨率达到eV量级,接近此类构型光谱仪的世界先进水平。该光谱仪采用PILATUS探测器作为位置灵敏探测器使用,并结合线站单色器和KOHZU平台系统开发了一套基于LabVIEW软件的XES数据获取系统。对光谱仪系统进行了能量分辨率测试和CuO发射谱测量实验,获得样品发射的能量为8 046 eV弹性散射峰的半高宽(Full-Width at Half Maximum, FWHM)为1.67 eV,表明基于PILATUS探测器的von Hamos构型XES谱仪系统可以满足高能分辨实验的需求。

关键词 PILATUS, 高能分辨X射线发射谱, von Hamos, 数据获取

中图分类号 TL81

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.090101

Data acquisition system of a von Hamos X-ray emission spectrometer based on PILATUS detector

GU Songqi^{1,2,3} MEI Bingbao² JIANG Zheng^{1,2} HUANG Yuying^{1,2}

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

2(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

3(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract [Background] High energy resolution X-ray emission spectroscopy (XES) has higher energy resolution than conventional X-ray absorption fine structure spectroscopy (XAFS), hence a powerful tool to explore the fine electronic structure of matter. The PILATUS detector is a single photon counting detector without dark current and readout noise. [Purpose] This study aims to build a von Hamos geometry high energy resolution XES and the data acquisition system (DAQ) at Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) that can be used to combine multiple spectral methods and carry out the deep resolution of elements and the fine resolution of chemical forms. [Methods]

国家重点研发计划“催化科学”重点专项(No.2021YFA1500502)资助

第一作者: 顾颂琦, 女, 1984年出生, 2017年于上海交通大学获硕士学位, 现为博士研究生, 研究领域为同步辐射谱学数据采集和探测器电子学

通信作者: 黄宇营, E-mail: huangyuying@sinap.ac.cn

收稿日期: 2022-05-11, 修回日期: 2022-08-03

Supported by National Key R&D Program "Catalysis Science" Key Project (No.2021YFA1500502)

First author: GU Songqi, female, born in 1984, graduated from Shanghai Jiaotong University with a master's degree in 2017, doctoral student, focusing on data acquisition and detector electronics of synchrotron radiation spectroscopy

Corresponding author: HUANG Yuying, E-mail: huangyuying@sinap.ac.cn

Received date: 2022-05-11, revised date: 2022-08-03

The PILATUS detector was applied as a position sensitive detector and KOHZU stages were used to provide high-precision adjustment of six dimensions of cylindrical curved crystal, an X-ray emission spectrometer based on von Hamos geometry was developed at BL14W1 beamline of SSRF. The data acquisition system of XES was developed based on a PILATUS detector, KOHZU stages, a monochromator and an ion chamber. The software of the spectrometer was developed on the LabVIEW platform and CALAB module. Resonant inelastic X-ray scattering (RIXS) and high energy resolution fluorescence detected X-ray absorption spectroscopy (HERFD-XAS) experiments were conducted to verify the performance of this XES. **[Results]** Results of energy resolution test and X-ray emission spectrum experiment of sample show that a resolution of 1.67 eV full-width at half maximum (FWHM) for elastic scattering peak of sample at 8 046 eV is achieved, which is close to the world advanced level. **[Conclusions]** The von Hamos geometry X-ray emission spectrometer based on PILATUS detector meets the need of high energy resolution experiment at SSRF.

Key words PILATUS, X-ray emission spectroscopy, von Hamos, Data acquisition

X射线发射谱^[1-2]属于二次光子过程,来源于外壳层电子向芯能级核空穴的跃迁,其末态为外壳层的核空穴,因此寿命展宽更低,可以获得高能量分辨率。高通量和高准直的第三代光源,结合高能量分辨发射谱仪,使得X射线发射谱(X-ray Emission Spectroscopy, XES)能量分辨率达到meV^[3],远超固体探测器的能量分辨率。XES是探究物质精细电子结构的有利工具,在化学^[4]、磁学^[5]、生物学^[6]等领域有着广泛的应用。

高能量分辨X射线发射谱仪的发展可以追溯到20世纪30年代,Johann等^[7]首次将弯晶应用于谱仪上,将X射线单色化,这款谱仪也以他的名字命名。随后,Johansson^[8]和von Hamos^[9]等也开展了高能量分辨谱仪的研究工作,并且设计了以他们名字命名的谱仪。目前,国际上高能量分辨X射线发射谱仪有两种模式:点到点扫描采集模式和色散采集模式。Johann型和Johansson型谱仪都采用点到点扫描采集模式,基于罗兰圆原理,采用球面弯晶将X射线单色化。所不同的是,Johann型谱仪的罗兰圆直径同晶体的曲率半径相等,而Johansson型谱仪中罗兰圆半径等于晶体的曲率半径。在欧洲同步辐射光源(European Synchrotron Radiation Facility, ESRF)的Rossendorf线站、斯坦福同步辐射光源(Stanford Synchrotron Radiation Lightsource, SSRL)的wiggler线站、瑞士光源(Swiss Light Source, SLS)的SuperXAS线站都相继搭建了单晶或者多晶联用的球面弯晶谱仪。而von Hamos型谱仪采用色散采集模式,柱面弯晶结合位置灵敏探测器可以同时采集到整个发射谱,具有时间分辨的功能,适合原位体系的探测。因为von Hamos构型谱仪对光源的通量要求比较高,国际上同步辐射线站中搭建的并不多,目前只有SLS和美国直线加速器(Linac Coherent Light Source, LCLS)相关实验站进行了搭建。而

SLS光源的SuperXAS线站搭建的von Hamos构型光谱仪在8 000~9 600 eV的能量范围内可以提供0.25 eV和1 eV量级的能量分辨率^[10]。

上海光源属于第三代同步辐射光源,结合高能量发射谱仪,可以搭建多种谱学方法相结合的研究平台和开展元素深度分辨及化学形态的精细分辨。上海光源BL14W1线站已经开展了一系列的谱仪研制工作,并取得了一定的成果,对上海光源二期建设相关的谱学实验站积累了经验。该实验站最初研制了一套单晶体Johann型的球面弯晶谱仪^[11],并开展了Eu(III)在 γ -MnOOH的表面吸附机理研究。后来成功搭建了国内首套三晶体Johann型的球面弯晶谱仪^[12-13],并开展了Mn化合物和ThO₂铀系化合物的实验。随着时间分辨原位实验的需求增多,建立一套von Hamos构型的波长色散高分辨发射谱谱仪显得十分必要。本文开展的工作主要侧重于光谱仪的数据获取系统。

1 von Hamos谱仪原理

图1为von Hamos构型高能量分辨X射线发射谱仪的示意图,由样品、柱面弯晶、位置灵敏探测器和平台系统组成。X射线入射到样品上,激发待测元素芯能级电子并发出荧光信号,样品发射的荧光信号入射到柱面弯晶上,经柱面弯晶衍射后被探测器接收,在探测器上显示图谱。柱面弯晶的结构有聚焦和分光的作用,弯曲方向为聚焦方向,母线方向为色散方向。母线方向上每一个位置可以衍射对应能量的X射线,并将其发射到探测器的不同位置上,从而实现对荧光光谱的波长色散分光。而柱面弯晶的母线每一位置处的圆周方向可以将同一能量的荧光信号进行聚焦。位置灵敏探测器一般选用二维面探测器,如本文使用的PILATUS探测器。平台系统是柱面弯晶的位置调节机构,本文涉及的谱仪平台

系统有 6 个维度的调节。

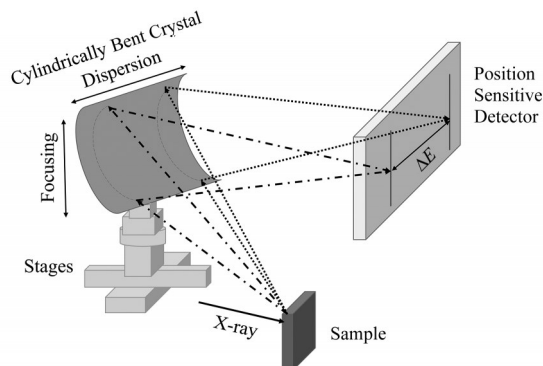


图1 von Hamos 构型谱仪示意图

Fig.1 Schematic of the von Hamos geometry spectrometer.

2 硬件架构

系统的硬件架构如图 2 所示,以太网为界分为面向用户的实验逻辑与数据获取和面向硬件的设备控制与数据采集。面向硬件的设备控制与数据采集层又包含 4 个部分:探测器及控制采集、平台系统及控制、单色器及控制和电离室及数据采集。探测器及控制采集采用了 PILATUS 探测器和 Camserver 控制软件。平台系统及控制采用了 KOHZU 平台和配套的驱动和控制设备。单色器及控制采用了 KOHZU 液氮水冷单色器和配套的驱动和控制设备,主轴编码器采用了 HEIDENHAIN 光栅编码器和配套读出设备 IBV660B。电离室及数据采集采用了高通量电离室、FEMTO 低噪音电流放大器、Quantum 公司的 100 MHz 电压频率转换器和 Tsuji 公司的 NCT08-01B 计数器。

2.1 PILATUS 探测器

PILATUS 探测器是一种多用途硅混合像素探

测器,采用单光子计数模式。它最早是瑞士光源 Broennimann 等^[14]的一个探测器研究项目,用于大分子晶体学实验站,随后该团队不断改进和优化探测器,使得探测器性能得到很大的提升。Kraft 等^[15]对一个校准的 PILATUS 模块进行计数率、能量分辨率、死时间等特性的研究,证明 PILATUS 探测器大大提高了表面衍射数据采集的灵敏度、可靠性和速度。此外,他们还设计出更大面积的探头^[16],多芯片模块并行读取,更短响应时间的产品应用于大分子晶体实验。目前的 PILATUS 探测器是 DECTRIS 公司的一款成熟的商业产品,它具有高动态范围、高计数率、快时间响应、无读出噪音、无暗电流等优势,特别适合应用于同步辐射实验。

PILATUS 探测器不同于其他面探测器:它将接收到的 X 射线直接转换为电荷,并在 CMOS 读出芯片中处理,这种设计没有读出噪音和暗电流。本次实验中使用的是 PILATUS 100K 探测器,有 487×197 个像素的连续阵列,其中每个像素的尺寸为 172 μm×172 μm,探测器有效的探测面积为 83.8 mm×33.5 mm。它的读出时间小于 3 ms,帧速率超过 200 s⁻¹,这种快时间响应探测器可以应用于时间分辨实验。

PILATUS 探测器的软件有两个:一个是数据采集和分析软件 TVX,一个是探头操作软件 Camserver。两者都运行于同一台 Linux 电脑上,在电脑内部通过数据指令进行通讯。Camserver 是一个控制硬件的底层接口软件,提供一个简单的用户命令行界面。TVX 有两个实验界面,一个是命令行的界面,用于探头控制和数据采集;一个是图形界面,用于数据的分析和显示。在 XES 数据获取系统中,需要在其他电脑的界面上对探测器进行控制 and 数据采集,通过调用 Camserver 软件中的指令来实现,详细介绍见§3 软件架构。

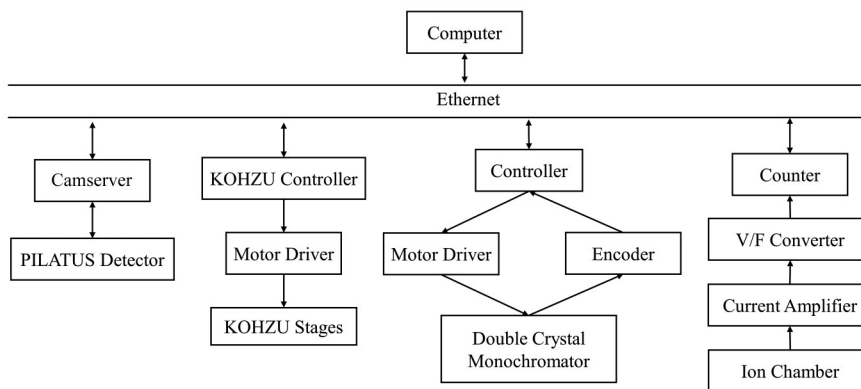


图2 硬件系统结构图

Fig.2 Block diagram of system hardware

2.2 KOHZU平台系统

如表1所示,谱仪的柱面弯晶需要6维调节,分别是 X 、 Y 、 Z 、Pitch、Roll和Yaw,而KOHZU光学定位平台具有高刚性、高精度、高重复精度和高稳定性的特点,可以满足谱仪的精密调节,所有维度的分辨率均满足谱仪调节精度的需求。

电机的驱动和控制设备采用了KOHZU新研发的ARIES/LYNX多轴控制系统。和KOHZU之前的SC系列控制器相比,新的控制器更适合4轴以上的控制系统,比如本文讨论的发射谱谱仪。一个控制系统最多可以控制32轴电机运动,包括5相电机、2相电机和伺服电机。在软件功能上,新的控制系统除了保留SC系列控制器的反馈控制和触发等功能外,还新增了伺服电机控制、通用I/O接口和软限位的功能。新控制系统的硬件架构如图3所示,

表1 柱面弯晶6种维度的调节
Table 1 Adjustment of six dimensions of cylindrical curved crystal

维度 Dimension	平台 Stage	分辨率(全步/半步) Resolution (step / half step)
X	XA16F-L2201	10 μm / 5 μm
Y	XA10A-L201	4 μm / 2 μm
Z	ZA07A-R3S	0.5 μm / 0.25 μm
Pitch	SA07A-RM	0.001 $^{\circ}$ / 0.000 $^{\circ}$
Roll	RA10A-W01	0.004 $^{\circ}$ / 0.002 $^{\circ}$
Yaw	SA07A-RB	0.000 96° / 0.000 48°

ARIES是主控制器,LYNX是从控制器,每个控制器连接两轴的运动控制,谱仪使用的是5相电机驱动器TITAN。这个控制系统可以通过PYXIS触摸屏进行手动控制,也可以用上位机控制软件通过网络远程控制。

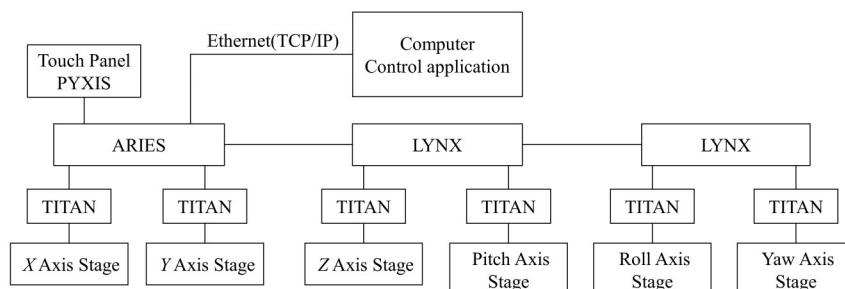


图3 KOHZU控制系统结构图
Fig.3 Block diagram of KOHZU control system

3 软件系统

3.1 软件结构

XES数据获取系统主要有运动控制部分和数据采集部分组成。运动控制部分分为KOHZU平台控制和单色器控制,单色器控制部分采用上海光源统一的控制系统EPICS (Experimental and Physics Industrial Control System)分布式控制软件,数据采集部分采用NI公司的LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)图形化编程软件。两者之间的通讯不再延用NI公司的DSC模块,而是选用开源的CALAB的通讯模块。CALAB数据库中的“INFO”、“GET”、“PUT”模块,只要输入正确的PV名,就可以在LabVIEW上面实现同一网段上特定PV的信息查询、值回读、赋值的控制操作。CALAB通讯方式比之前的DSC通讯方式更加的便捷和稳定,不需要在工程项目中事先设置好PV的值,也不需要每次执行程序前部署所有的PV,避免了两

个系统间的通讯故障,方便程序的维护、移植和拓展。

图4为XES数据获取系统的流程图,实验开始后系统中的各个硬件设备进行初始化配置,初始化完成后进行谱仪的调试。柱面弯晶的晶面指数、曲率半径、待测荧光谱线的能量将确定样品点、柱面弯晶以及探测器的理论位置坐标。在理论位置坐标附近,逐一扫描KOHZU平台系统单一维度的电机,通过探测器采集的设定区域内光斑总计数量的变化,得到计数最大时的电机位置信息,即光斑最强时的平台位置,并将电机停留在该位置。扫描完所有维度的电机,此时探测器采集的光斑最强。完成谱仪调试后进行RIXS采集,即单色器运动到待测元素的初始能量位置,探测器根据用户设定采集参数进行一次采集,采集完成后程序根据用户设定的步长计算下一个能量位置,单色器运动到该能量位置,探测器进行一次采集,直到单色器走到最终能量位置,停止采集。完成RIXS采集后,根据采集数据进行数据的处理和分析。

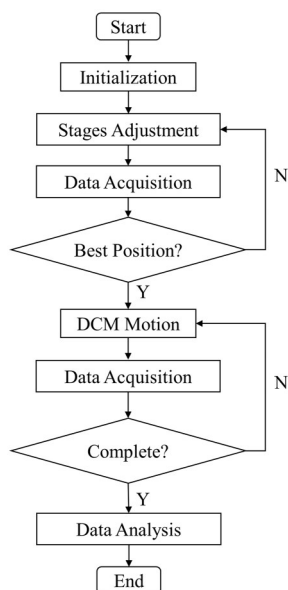


图4 XES 数据获取系统流程图
Fig.4 Flow chart of XES DAQ system

3.2 实验界面

如图 5 所示, XES 数据获取系统的实验界面是基于 LabVIEW 平台的友好化人机界面, 可以完成 PILATUS 探测器的采集、PILATUS 探测器的数据分析和单色器联动的 RIXS 实验采集。图 5(a) 为 PILATUS 探测器程序库, 包含系统需要调用的指令模块。图 5(b) 为 PILATUS 探测器采集界面, 可以实现探头主要参数的设置, 探头状态的回读和文件保存。对比 TVX 的命令行界面, 本文开发的采集界面不仅操作简单, 还新增加了二维图像的实时显示和区域总计数的统计功能。图 5(c) 为 PILATUS 探测器数据分析界面, 可以对保存的二维图像数据进行分析, 相当于简化版的 TVX 图形界面。图 5(d) 为设备间联动的 RIXS 实验采集界面, 集成了单色器运动和探测器采集, 可以实现 RIXS 实验的自动化采集。

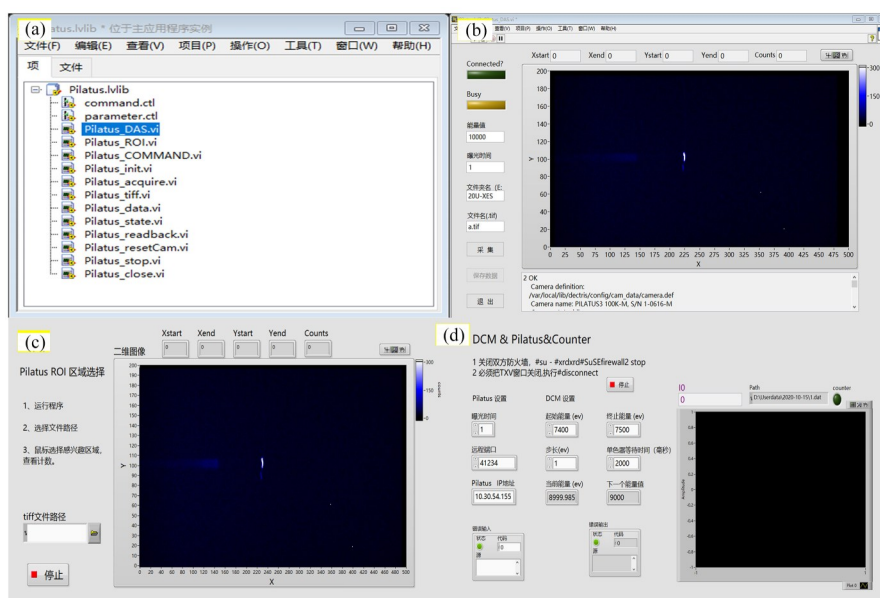


图5 XES 数据获取系统

(a) PILATUS 探测器程序库, (b) PILATUS 探测器采集界面, (c) PILATUS 探测器数据分析界面, (d) RIXS 实验采集界面
Fig.5 Data acquisition system of XES (a) Library of PILATUS detector, (b) DAQ interface of PILATUS detector, (c) Interface of PILATUS detector data analysis, (d) Interface of RIXS experiment

4 系统的性能测试及实验应用

在 BL14W1-XAFS 线站, 基于这套 von Hamos 构型高能分辨 X 射线发射谱仪装置和数据获取系统, 我们进行了部分样品的测试工作, 如图 6(a) 所示为测试现场的实物图照片。BL14W1 是一条 wiggler 光束线站, 在样品处的光子通量为 $5 \times 10^{12} \text{ s}^{-1} @ 10 \text{ keV}$, 通过狭缝将垂直方向的光斑卡至 $150 \mu\text{m}$, 与探测器的像素尺寸相匹配。首先, 我们对谱仪的

能量分辨率进行了测试。单色器为 Si(111) 时, 柱面弯晶谱仪的晶面指数为 Si(444) 尺寸为 $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ (色散 $\times$ 聚焦), 弯晶曲率半径为 250 mm , 探测样品发射的能量为 8046 eV 的弹性散射峰, 如图 6(b) 所示, 其半高宽 (Full-Width at Half Maximum, FWHM) 为 1.67 eV , 接近谱仪理论计算分辨率 1.3 eV , 远优于目前常用的探测器分辨率 (大于 120 eV)。在此基础上, 我们用标准 CuO 样品进行了发射谱测试^[17]。如图 6(c) 所示, CuO 的 K_{α} -RIXS 三

维等高线图谱显示了两个中心,分别是发射能量约为8 026 eV和8 046 eV的 $K_{\alpha 2}$ 和 $K_{\alpha 1}$ 谱线。如图6(d)所示,通过对 $K_{\alpha 1}$ -RIXS的中心进行积分,获得了恒定发射能量谱线(Constant Emission Energy, CEE)即Cu的K边HERFD-XANES。通过与常规XANES谱对比,HERFD-XANES谱中显示了更多的精细结构,一些在常规XANES谱中不明显的特征峰,也在高分辨谱中得到了放大。

如图6(e)所示,利用原位HERFD-XANES方法探究了CuPc模型分子催化剂在反应过程中施加电位诱导的结构转变^[18]。通过对不同电位下Cu K边HERFD-XAFS分析,基于特征峰的强度变化并结合谱学模拟,明确了单分散的Cu物种随着电位偏移而聚集,形成Cu团簇,为 C_2H_4 的生成提供了C-C偶联的活性位点。

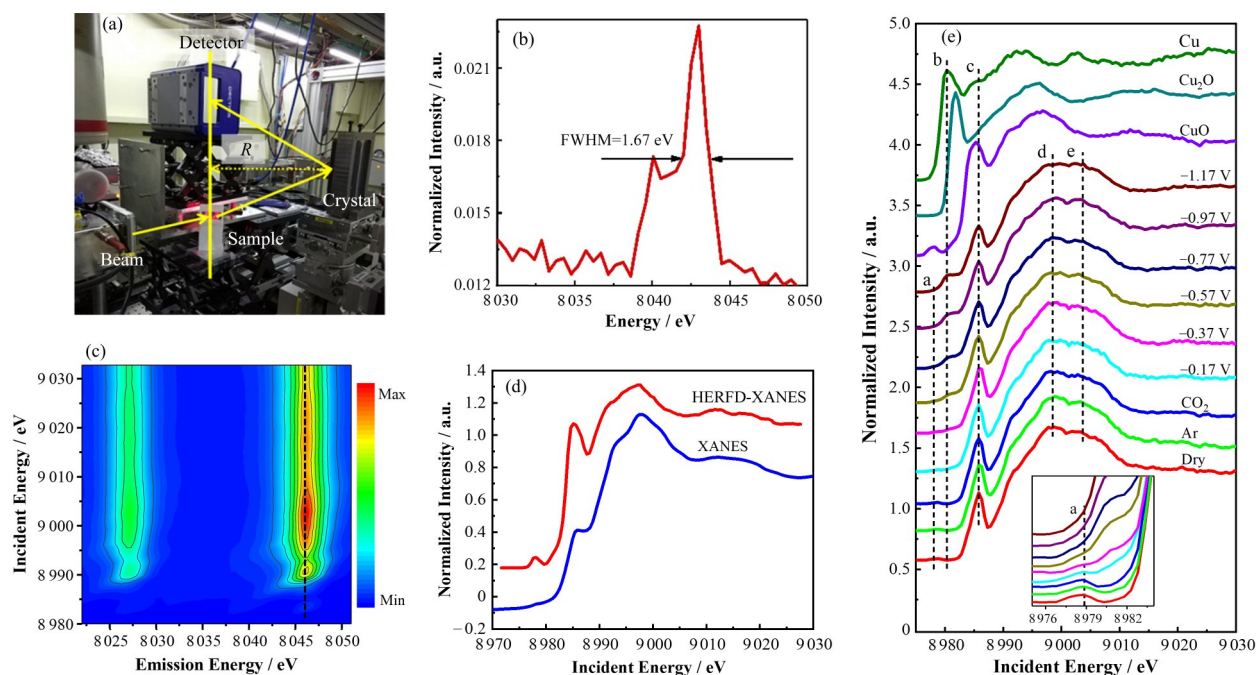


图6 性能测试和实验应用 (a) 谱仪实物图, (b) 入射X射线能量为8 046 eV的弹性散射峰, (c) CuO标准样品中Cu的 K_{α} -RIXS谱, (d) 沿着(c)图中黑色虚线积分获得的HERFD-XANES谱与常规Cu K边XANES谱线对比, (e) 不同电位下Cu K边HERFD-XAFS谱

Fig.6 Performance test and experimental application (a) Photograph of the spectrometer, (b) The elastic scattering peak with incident X-ray of 8 046 eV, (c) K_{α} -RIXS plane of CuO around the Cu K-edge, (d) HERFD-XANES and conventional XANES spectra of CuO, the HERFD-XANES spectrum was obtained by integrating the RIXS intensity along the dashed line in (c), (e) The HERFD-XANES spectrum of Cu K-edge at different potentials

5 结语

本文发展了一套基于PILATUS探测器的von Hamos构型的波长色散发射谱数据获取系统。该系统包括数据探测、数据获取和数据处理,未来将进一步完善数据能量校准,批量处理发射谱数据等工作。在上海光源BL14W1-XAFS线站,对国内首套von Hamos构型的光谱仪进行测试,能量分辨率达到电子伏,接近世界先进水平。本文积累的发射谱数据获取的经验为后续发展专用发射谱线站等奠定了基础。

作者贡献说明 顾颂琦:负责谱仪数据采集系统的搭建、文章的起草和最终版本的修订;梅丙宝:负责谱仪的搭建、实验数据的收集和分析;姜政:负责谱

仪的整体设计;黄宇营:负责项目的管理、整体文章的设计和修改。

参考文献

- de Groot F. High-resolution X-ray emission and X-ray absorption spectroscopy[J]. Chemical Reviews, 2001, **101** (6): 1779 - 1808. DOI: 10.1021/cr9900681.
 - Gallo E, Glatzel P. Valence to core X-ray emission spectroscopy[J]. Advanced Materials, 2014, **26**(46): 7730 - 7746. DOI: 10.1002/adma.201304994.
 - 丁洪. 共振非弹性X射线散射: 一种新型的X射线谱学探测方法的介绍[J]. 物理, 2010, **39**(5): 324 - 330.
- DING Hong. Resonant inelastic X-ray scattering—introduction of a novel spectroscopic technique[J].

- Physics, 2010, **39**(5): 324 – 330.
- 4 Gul S, Ng J W D, Alonso-Mori R, *et al.* Simultaneous detection of electronic structure changes from two elements of a bifunctional catalyst using wavelength-dispersive X-ray emission spectroscopy and *in situ* electrochemistry[J]. Physical Chemistry Chemical Physics: PCCP, 2015, **17**(14): 8901 – 8912. DOI: 10.1039/c5cp01023c.
- 5 Sikora M, Juhin A, Weng T C, *et al.* Strong K-edge magnetic circular dichroism observed in photon-in-photon-out spectroscopy[J]. Physical Review Letters, 2010, **105**(3): 037202. DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.037202.
- 6 Lancaster K M, Roemelt M, Ettenhuber P, *et al.* X-ray emission spectroscopy evidences a central carbon in the nitrogenase iron-molybdenum cofactor[J]. Science, 2011, **334**(6058): 974 – 977. DOI: 10.1126/science.1206445.
- 7 Johann H H. Die erzeugung lichtstarker röntgenspektren mit hilfe von konkavkristallen[J]. Zeitschrift für Physik, 1931, **69**(3): 185 – 206. DOI: 10.1007/BF01798121.
- 8 Johansson T. Über ein neuartiges, genau fokussierendes röntgenspektrometer[J]. Zeitschrift für Physik, 1933, **82**(7): 507 – 528. DOI: 10.1007/BF01342254.
- 9 v Hamos L. Röntgenspektroskopie und abbildung mittels gekrümmter kristallreflektoren. I. geometrisch-optische betrachtungen[J]. Annalen Der Physik, 1933, **409**(6): 716 – 724. DOI: 10.1002/andp.19334090608.
- 10 Szlachetko J, Nachtegaal M, de Boni E, *et al.* A von Hamos X-ray spectrometer based on a segmented-type diffraction crystal for single-shot X-ray emission spectroscopy and time-resolved resonant inelastic X-ray scattering studies[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, **83**(10): 103105. DOI: 10.1063/1.4756691.
- 11 Gao X, Gu S Q, Gao Q, *et al.* A high-resolution X-ray fluorescence spectrometer and its application at SSRF[J]. X-Ray Spectrometry, 2013, **42**(6): 502 – 507. DOI: 10.1002/xrs.2511.
- 12 Duan P Q, Gu S Q, Cao H J, *et al.* A three-crystal spectrometer for high-energy resolution fluorescence-detected X-ray absorption spectroscopy and X-ray emission spectroscopy at SSRF[J]. X-Ray Spectrometry, 2017, **46**(1): 12 – 18. DOI: 10.1002/xrs.2719.
- 13 顾颂琦, 段佩权, 张硕, 等. 基于LabVIEW的高能量分辨谱仪数据采集系统[J]. 核技术, 2017, **40**(10): 100102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.100102.
- GU Songqi, DUAN Peiquan, ZHANG Shuo, *et al.* A data acquisition system of high energy resolution spectrometer based on LabVIEW[J]. Nuclear Techniques, 2017, **40**(10): 100102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.100102.
- 14 Bronnimann C, Baurb R, Eikenberry E F, *et al.* A pixel read-out chip for the PILATUS project[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2001, **465**: 235 – 239. DOI: 10.1016/S0168-9002(01)00396-5.
- 15 Kraft P, Bergamaschi A, Broennimann C, *et al.* Performance of single-photon-counting PILATUS detector modules[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2009, **16**(Pt 3): 368 – 375. DOI: 10.1107/S0909049509009911.
- 16 Broennimann C, Eikenberry E F, Henrich B, *et al.* The PILATUS 1M detector[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2006, **13**: 120 – 130. DOI: 10.1107/S0909049505038665.
- 17 Mei B B, Gu S Q, Du X L, *et al.* A wavelength-dispersive X-ray spectrometer for in/ex situ resonant inelastic X-ray scattering studies[J]. X-Ray Spectrometry, 2020, **49**(1): 251 – 259. DOI: 10.1002/xrs.3132.
- 18 Mei B B, Liu C, Li J, *et al.* Operando HERFD-XANES and surface sensitive $\Delta\mu$ analyses identify the structural evolution of copper(II) phthalocyanine for electroreduction of CO₂[J]. Journal of Energy Chemistry, 2022, **64**(1): 1 – 7. DOI: 10.1016/j.jechem.2021.04.049.