

上海同步辐射光源纳米三维成像线站设计、研发及调试

陶芬¹, 张玲¹, 苏博^{2,3}, 高若阳^{2,3}, 杜国浩¹, 邓彪^{1,2,3*}, 谢红兰¹, 肖体乔¹

¹中国科学院上海高等研究院上海光源科学中心, 上海 201204;

²中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 全场透射 X 射线显微镜(TXM)具有纳米量级空间分辨、原位、无损和三维(3D)成像等优点,目前已被广泛应用于多个研究领域中。纳米三维成像线站是上海同步辐射光源(SSRF)二期工程建设内容之一,该线站瞄准前沿领域中的科学问题和国家战略需求,主要实验方法为 TXM 和纳米计算机断层扫描(CT),能量范围为 5~14 keV,空间分辨率的设计指标为 20 nm。该线站基于弯铁光源,光束线采用柱面准直镜、双晶单色器和超环面聚焦镜设计方案。实验线站采用自主设计、整体集成的全场 TXM 系统,实验站中单毛细管聚焦元件、TXM 机械系统、纳米 CT 控制及数据采集软件均为自主研发。2021 年 SSRF 纳米三维成像线站(BL18B)完成了带光调试与性能测试,实现了 20 nm 分辨率的 TXM 成像,是国际上首条基于弯铁光源并实现 20 nm 分辨率成像的光束线站,测试结果全部达到线站设计指标,2022 年该线站将对用户开放使用。

关键词 X 射线光学;透射 X 射线显微镜;同步辐射;单毛细管聚焦镜;自主研发

中图分类号 O434.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2334001

Design, Development and Commissioning of 3D Nano Image Beamline at Shanghai Synchrotron Radiation Facility

Tao Fen¹, Zhang Ling¹, Su Bo^{2,3}, Gao Ruoyang^{2,3}, Du Guohao¹, Deng Biao^{1,2,3*},
Xie Honglan¹, Xiao Tiqiao¹

¹Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China;

²Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

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

Abstract Full-field transmission X-ray microscope (TXM) has been widely applied in many research fields owing to its various strengths, such as in-situ non-destructive three-dimensional (3D) imaging with a nanoscale spatial resolution. 3D nano image beamline, a part of the Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) phase-II project, focuses on cutting-edge scientific problems and national strategic needs. The main experimental methods are TXM and nano-computed tomography (nano-CT), and the energy range is 5–14 keV. The design goal for spatial resolution is 20 nm. Based on a bending magnet source, the beamline is built with a cylindrical collimating mirror, a double crystal monochromator, and a toroidal condenser. The experimental endstation adopts a self-designed and integrated full-field TXM system, and the mono-capillary condenser, the TXM mechanical system, and the nano-CT control and data acquisition software of the experimental endstation are all developed independently. The commissioning and performance tests of the SSRF 3D nano image beamline (BL18B) have been completed in 2021, with a resolution of 20 nm achieved for TXM imaging. This beamline is the first TXM beamline based on a bending magnet source in the world with a 20 nm imaging resolution. All the test results have reached the design goals for this beamline, and it will open to users in 2022.

收稿日期: 2022-03-29; 修回日期: 2022-05-08; 录用日期: 2022-06-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2021YFA1600703, 2021YFF0601203)、国家自然科学基金大装置联合基金重点项目(U1932205)

通信作者: *dengbiao@zjlab.org.cn

Key words X-ray optics; transmission X-ray microscope; synchrotron radiation; mono-capillary condenser; independent design

1 引言

随着同步辐射光源和 X 射线成像光学元件的发展, X 射线显微成像技术得到了进一步发展^[1-3]。例如, 在空间分辨率方面, 硬 X 射线波段的同步辐射纳米成像已经实现了 20 nm 空间分辨率的成像。同步辐射纳米成像方法的主要技术方案包括全场透射 X 射线显微镜(TXM)成像^[4]、纳米探针扫描成像和纳米分辨相干衍射成像。TXM 具有很多独特的优点: 1) 穿透性强, 能够对厚样品进行高分辨无损的三维成像; 2) 成像方法多样, 如吸收、散射和相位等都可以用来成像, 特别是 X 射线相位衬度成像, 更适合对轻元素组成的样品进行成像^[5-6]。目前国际上许多同步辐射装置建有专用的硬 X 射线 TXM 线站, 例如: NSLS-II 的 18ID、SSRL 的 BL6-2C、PLS-II 的 7C XNI 和 DESY Petra III 的 P05 等。另外, 部分线站兼具 TXM 功能, 例如: ESRF 的 ID21、Spring-8 的 BL47XU、APS 的 26ID-C 与 32ID-C 和 SLS 的 TOMCAT 等^[7-8]。国内北京同步辐射装置(BSRF)已建成 30 nm 空间分辨率的 TXM 装置, 北京高能同步辐射(HEPS)正在建设专用 TXM 线站^[9]。

上海同步辐射光源(SSRF)纳米三维成像线站将瞄准纳米材料^[10-11]、生命科学^[12]、新能源^[13-14]和新一代信息技术等领域中的前沿科学问题和国家战略需求, 发挥该线站纳米分辨三维结构表征技术的优势, 为相关学科领域提供先进的纳米结构表征实验平台。

上海同步辐射光源纳米三维成像线站使用弯铁光源, 光子能量覆盖 5~14 keV。实验站基于全场透射模式, 可实现 20 nm 空间分辨率的成像, 满足线站科学目标的需求。主要实验方法包括 TXM、纳米计算机断层扫描(CT)等, 其中: TXM 可将二维空间分辨率提高到 20 nm; 纳米 CT 可实现样品纳米尺度三维结构的无损表征。除了可实现以上的实验方法外, 还具备 TXM、纳米 CT 与 X 射线荧光分析(XRF)、X 射线吸收近边结构(XANES)等方法结合的潜能, 可获得样品成分、化学态等在纳米尺度上的空间信息。

2 光束线设计

纳米三维成像线站光束线从上海同步辐射光源的 18B 单元引出, 光束线主要包括柱面准直镜(M1)、双晶单色器(DCM)、超环面聚焦镜(M2)、狭缝(S1/S2)、荧光靶、X 光位置探测器(XBPM)和铍窗等。纳米三维成像光束线光学设计的总体依据是满足全场纳米成像对相空间的需求, 主要从高通量、高次谐波抑制, 以及与实验站椭球镜的匹配效率等方面考虑, 采用双晶单色器、超环面聚焦镜、单毛细管椭球聚焦镜的设计方案。主要光学元件准直镜、双晶单色器和超环面聚焦镜分别位于光束线 20.2、23、26 m 处, 超环面聚焦镜的

理论焦点位置在 39 m 处, 在此处设置精密四刀狭缝以调整入射到波带片全场成像系统中的 X 射线光束。光束线主要光学元件布局及设计光路如图 1 所示, 其中 BM 为弯铁光源, CCD 为电荷耦合器件。

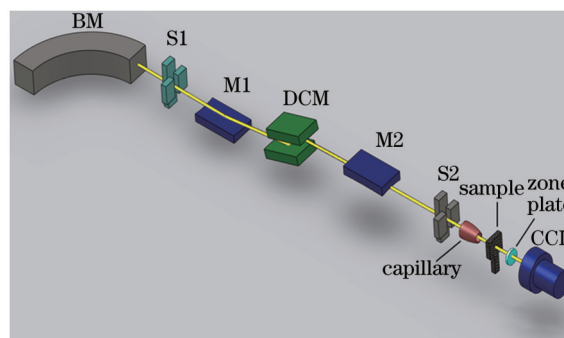


图 1 纳米三维成像光束线总体布局示意图

Fig. 1 Overall layout of 3D nano image beamline at SSRF

2.1 性能指标

纳米三维成像线站的设计目标是满足光束线站应用目标对光束线性能的要求, 包括 4 个主要性能参数: 成像空间分辨率、样品处的光子通量、光子能量范围和能量分辨率。各个参数的主要指标如下。

1) 成像空间分辨率

空间分辨率是本光束线的标志性技术指标, 本线站选择波带片作为成像光学元件, 成像分辨率的设计指标为 20 nm。

2) 样品处的光子通量

更高的光子通量意味着更高的探测灵敏度和更短的测量时间, 故高通量是本光束线设计的一个重要目标。

3) 能量范围

本线站的科学目标是纳米材料结构研究, 故选用硬 X 射线波段。根据目前波带片的加工工艺, 其在 14 keV 能量以上效率较低, 故将能谱上限定为 14 keV。鉴于本光束线的样品是置于空气中的, 故将能谱下限定为 5 keV, 即能量范围为 5~14 keV。

4) 能量分辨率

波带片成像系统要求入射光的单色性满足要求, 对于环带数为 2000 的波带片, 要求入射光的单色性优于 5×10^{-4} @8 keV, 故能量分辨率需要达到此要求。

上海同步辐射光源纳米三维成像光束线站设计指标如表 1 所示。

2.2 光束线模拟分析

本线站采用光线追迹软件 SHADOW 对光束线性能进行了模拟分析, 计算分析了样品处光斑的通量、光斑尺寸、能量分辨率、主要部件的传输特性和热负载分布。计算中考虑了反射镜面形误差、单色器第一晶体的变形等因素。

表 1 上海同步辐射光源纳米三维成像光束线站设计指标
Table 1 Design goals of 3D nano image beamline at SSRF

| Component | Index | Value |
|------------|---|----------------------|
| Beamline | Energy range /keV | 5-14 |
| | Energy resolution @8 keV | 5.0×10^{-4} |
| | Photon flux at sample@8 keV@300 mA /($\text{photon} \cdot \text{s}^{-1}$) | 5×10^9 |
| Endstation | Spatial resolution@8 keV(TXM) /nm | 20 |

1) 光通量分析

光通量分析主要需要考虑光束线的传输效率,主要包括:几何效率、光学元件的反射率、束线与实验站的匹配效率、铍窗的吸收和空气的衰减。在入射光张角为 $0.4 \text{ mrad} \times 0.22 \text{ mrad}$ 的条件下,几何效率的损失主要由柱面准直镜、超环面聚焦镜和实验站旋转椭球聚焦镜等光学元件产生。束线与实验站的匹配效率主要是指次级光源点与实验站旋转椭球聚焦镜之间的数值孔径匹配接收效率。XOP 计算得到 8 keV 能量时弯铁光源通量的理论值为 $5.7 \times 10^{12} \text{ photon/s}$ (0.1% 带宽下) 0.1% BW。受到光束线传输效率的影响,计算得到的次级光源点的光通量约为 $2.6 \times 10^{11} \text{ photon/s}$ 。

2) 光源点尺寸和发散角

SHADOW 追迹得到 8 keV 能量时弯铁光源点的光斑尺寸[半峰全宽(FWHM)]约为 $171 \mu\text{m} \times 54 \mu\text{m}$, 发散角约为 $0.4 \text{ mrad} \times 0.22 \text{ mrad}$ 。考虑到单色器热形变(小于 5 mrad)和镜子面形误差(子午方向小于 0.8 mrad,弧矢方向小于 5 mrad),SHADOW 追迹得到 8 keV 能量时次级光源点的光斑尺寸(半峰全宽)约为 $86 \mu\text{m} \times 134 \mu\text{m}$, 发散角约为 $0.73 \text{ mrad} \times 0.30 \text{ mrad}$ 。

3) 能量分辨率

由 SHADOW 模拟计算得到 8 keV 能量时, Si(111) 双平晶单色器的能量分辨率为 1.3×10^{-4} 。

4) 关键光学元件热分析和热负载分析

准直镜水平放置,高温集中在光斑中心处,最高温度为 30.3°C ,最大热应力为 18.6 kPa ,热功率引起镜

子中心的最大变形量为 $12.3 \mu\text{m}$,利用水冷较好地控制了准直镜温度的升高,很好地控制了面形误差,达到了提出的要求。单色器晶体热变形会影响聚焦光斑的形状,从而影响样品点的光通量,为此要求热负载引起的单色器晶体形变尽量小,此时单色器最高温度为 36.7°C ,最大热应力为 0.4 MPa ,最大变形量为 $0.84 \mu\text{m}$,通过水冷后一晶的形变得到了有效控制,达到了所要求。

3 实验站设计

纳米三维成像线实验站将开展 TXM 和纳米 CT 等实验。实验站还具备发展 TXM 与 XANES 等方法结合的潜能,可获得样品三维结构、成分和化学态等在纳米尺度上的空间信息。参照国际纳米 CT 实验站配置和发展趋势,纳米 CT 实验站配有单毛细管椭球聚焦镜、针孔、样品台、波带片、相移环和成像 CCD 等关键元件。纳米三维成像实验站原理图,如图 2 所示。

纳米成像系统及其关键聚焦元件椭球镜一直被国外公司垄断,器件价格昂贵,且技术支持和维护费用也很高。为实现纳米成像系统的自主研发,经过 4 年多的联合攻关,成功攻克了毛细管拉制成型工艺控制、参数精密检测和成品率低等技术难题,2019 年成功实现了单毛细管椭球镜的研制。在此基础上,上海同步辐射光源同时解决了高稳定机械系统设计与集成、精密运动控制与数据采集等一系列技术难题,自主研发了国内首套专用纳米 CT 系统。

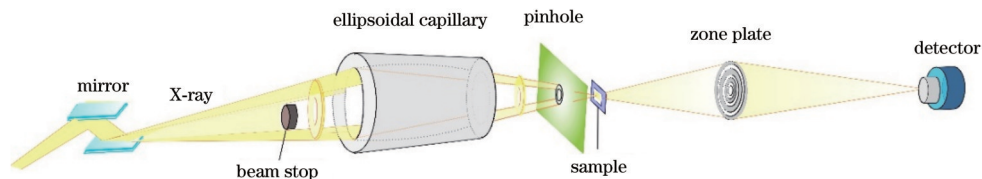


图 2 纳米三维成像实验站原理图

Fig. 2 Schematic diagram of 3D nano image beamline endstation at SSRF

3.1 单毛细管椭球聚焦镜

椭球聚焦镜是一种反射面为椭球的单毛细管,是纳米全场成像的核心部件,具有两个功能:其一,将次级光源点的 X 射线会聚到样品点处,以提高样品点处的光通量密度;其二,根据成像的系统要求,聚焦镜出射光的数值孔径应与波带片环状照明的数值孔径一致。椭球镜具有传输效率高、像差小、能提供 TXM 所需的均匀照明视场等特点, TXM 装置大多采用它作为

聚焦元件。上海同步辐射光源二期纳米三维成像线站采用弯铁光源,为提高成像效率,椭球聚焦镜是 TXM 装置聚焦的最佳选择。

图 3 是椭球聚焦镜的光学原理示意图。X 射线次级光源点处于椭球的一个焦点 F 处,掠入射照射到旋转椭球聚焦镜表面上,经表面全反射后聚焦在旋转椭球镜的另一焦点 F' 处(样品点处)。在光轴上放置光阑,形成照明样品的空心聚焦光锥,聚焦后形成环状光

斑照射在波带片上^[15]。

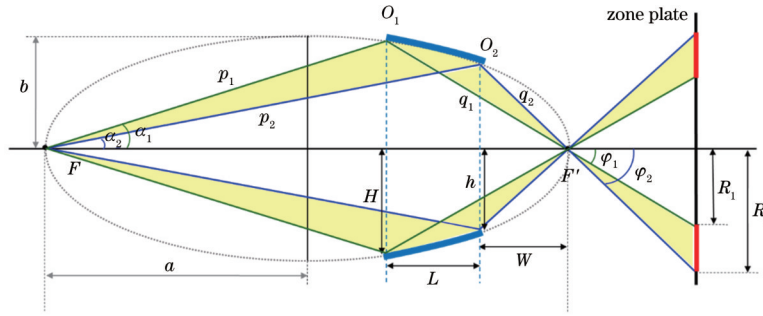


图 3 旋转椭球聚焦镜原理示意图^[15]

Fig. 3 Schematic diagram of rotating ellipsoidal capillary^[15]

根据上海同步辐射光源二期纳米成像光束线站的参数,设计椭球聚焦镜的参数如表 2 所示。

表 2 椭球聚焦镜的物理参数

Table 2 Parameter of ellipsoidal capillary

| Model | Length of ellipsoidal capillary L / mm | Entry radius $H / \mu\text{m}$ | Exit radius $h / \mu\text{m}$ | Semi major axis a / mm | Semi minor axis b / mm | Working distance W / mm | Maximum accepted divergence of capillary φ_2 / mrad |
|---------|---|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|
| ABS25-8 | 101 | 281 | 172 | 1000 | 0.524 | 55 | 6.2 |

3.2 波带片

波带片是 X 射线“透镜”的一种,利用 Au 或者 Ni 刻蚀来挡住偶(奇)数半波带,进而可实现透过奇(偶)数级波带的光场的相干相长。波带片在纳米成像中作为物镜实现放大成像,将纳米尺度信息放大到微米量级,然后用具有微米分辨率的 X 射线探测器进行成像。在平行光入射的条件下,根据瑞利判据对空间分辨率的定义和光栅一级衍射原理,可求出波带片最外环宽度 Δr 和空间分辨率 δ 之间的关系为

$$\delta = 1.22 \cdot \Delta r. \quad (1)$$

由于 X 射线穿透性强、相互作用弱,故与透射光相比,衍射光太弱。此时,若采用正入射的照明方式,连续穿过样品和波带片的透射光将会直接到达探测器,进而引起成像本底过高,信噪比太低。斜入射不但可以避免这一现象,而且可以将波带片的空间分辨率提高一倍。对于 TXM 系统,椭球聚焦镜产生的空心光锥照明波带片采用了斜入射的方式,可以将波带片的空间分辨率提高一倍^[16],即

$$\delta = 0.61 \cdot \Delta r. \quad (2)$$

上海同步辐射光源纳米成像线站采用 Applied Nanotools 公司制备的波带片作为放大光学元件,波带片的最外环宽度为 25 nm,直径为 125 μm 。

4 线站调试

纳米三维成像线站于 2016 年 11 月开始建设,经过 5 年的努力,完成了光束线的安装、准直与调试,并于 2021 年 12 月进行了线站的光束线与实验站的调试。上海同步辐射光源纳米三维成像线站(BL18B)装置图如图 4 所示。

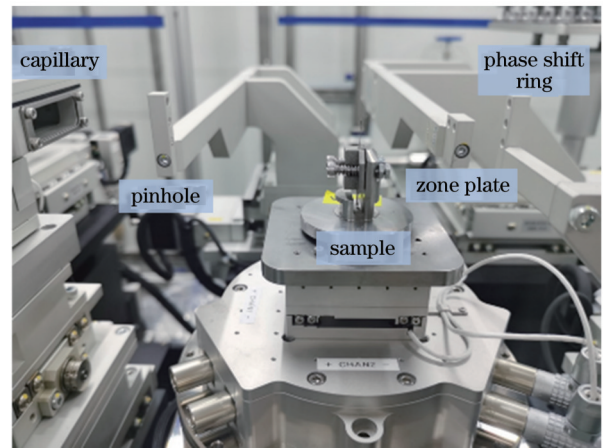


图 4 上海同步辐射光源自主研制的 TXM 系统

Fig. 4 TXM system independently developed by SSRF

纳米三维成像线站主要调试与测试的指标为能量范围、能量分辨率、样品处光通量和空间分辨率等参数。下面介绍线站各个参数的调试方法和结果。

4.1 能量范围

为了确定单色器出光能量的范围准确性,通过选择 Ti 元素的 K 边(能量为 4.966 keV)与 Au 元素的 L1 (能量为 14.353 keV)边吸收谱来确定单色器的能量是否可以达到设计范围。使用高纯度的 Ti 和 Au 金属标准箔片、气体电离室和电子学系统进行检测。将元素吸收片放置在两个电离室的中间,通过电流表读数来观察采集元素的吸收边。

两种元素的 X 射线吸收近边结构(XANES)谱测试结果如图 5 所示。Ti 元素的 K 吸收边能量理论值为 4966.4 eV,测得的 Ti 元素的 K 边吸收谱如图 5(a)所

示,其中 I_1 为电离室 1 的计数, I_2 为电离室 2 的计数。Au 元素的 L1 吸收边的能量理论值为 14352.8 eV, 测得的 Au 元素的 L1 边吸收谱如图 5(b) 所示。因此, 测

得的单色光能量范围为 5~14 keV, 满足线站的设计与验收指标。

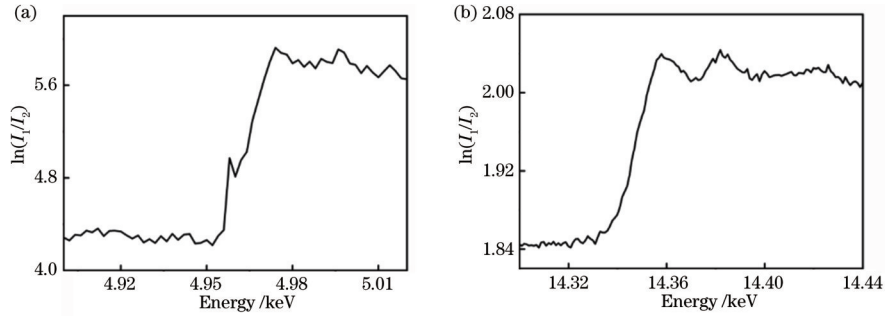


图 5 XANES 谱线。(a) Ti 元素标准样品 K 边 XANES 谱测试曲线; (b) Au 元素标准样品 L1 边 XANES 谱测试曲线

Fig. 5 XANES spectra. (a) XANES spectrum of Ti K-edge; (b) XANES spectrum of Au L1-edge

4.2 能量分辨率

在固定能量下, 利用双晶单色器二晶的 Pitch2 角度调节得到摇摆曲线, 将摇摆曲线的半峰全宽作为该能量下的能量分辨率。使用气体电离室和电子学系统测量单色器二晶的摇摆曲线, 重复测量三次, 取平均值作为该能量下的能量分辨率, 此时白光狭缝开口大小为 8.0 mm × 4.4 mm, 单色光狭缝开口大小为 8.0 mm × 8.0 mm。能量分辨率的计算公式为

$$\frac{\Delta E}{E} = \sqrt{(\Delta\delta_s)^2 + (\Delta\delta_d)^2} \cdot \cot\theta \approx \Delta\theta \cdot \cot\theta, \quad (3)$$

式中: ΔE 为能量变化量; E 为 X 射线光子能量; $\Delta\delta_s$ 为入射光束的垂直发散角; $\Delta\delta_d$ 为晶体的 Darwin 宽度; θ 为布拉格角; $\Delta\theta$ 为摇摆曲线的半峰全宽。

三次测试数据如表 3 所示, 摇摆曲线如图 6 所示, 其半峰全宽分别为 46.92、46.92、46.35 μrad , 计算得到 8 keV 能量下的能量分辨率平均值为 1.83×10^{-4} 。

表 3 能量分辨率三次测试结果

Table 3 Three test results of energy resolution

| Test No. | Peak position / μrad | FWHM / μrad | Energy resolution | Average of $\Delta E/E$ |
|----------|---------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 1 | 188.64 | 46.92 | 1.84×10^{-4} | $(1.83 \pm 0.01) \times 10^{-4}$ |
| 2 | 187.81 | 46.92 | 1.84×10^{-4} | |
| 3 | 187.81 | 46.35 | 1.82×10^{-4} | |

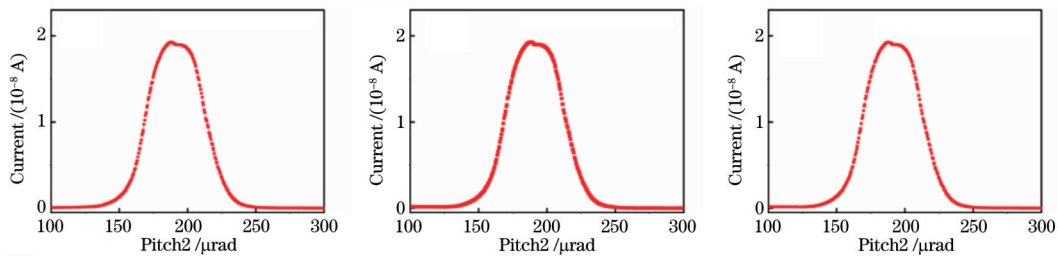


图 6 8 keV 能量处摇摆曲线的三次测量结果

Fig. 6 Three test results of rocking curve at energy of 8 keV

4.3 样品处光通量

由于上海同步辐射光源正常运行的电流强度为 200~260 mA, 实验测试时储存环运行的电流强度为 200 mA, 故测量完成后需将数值换算成 300 mA 下的数值以与设计指标进行对比。测量方法是在 8 keV 能量下, 将电离室放置于样品点处, 通过检测样品点处电离室的电流表计数, 综合考虑空气吸收等因素后推算得到 300 mA 下样品点的光通量密度。使用电离室和电子学系统将入射光能量调节至 8 keV, 此时电流强

度为 200 mA, 白光狭缝大小为 8.0 mm × 4.4 mm, 单色光狭缝大小为 8.0 mm × 8.0 mm。电离室中充斥着空气, 电离室电极长度为 10 mm, 高压为 800 V。用电离室进行测量, 8 keV 能量下光子通量的计算公式为

$$N = \frac{I_0 \epsilon_0}{e E \eta}, \quad (4)$$

式中: N 为光子通量; I_0 为电离室的电流; ϵ_0 为工作气体的平均电离能(空气的平均电离能为 34.4 eV); e 为电子电荷量; η 为电离室的效率, 其表达式为

$$\eta = 1 - \exp(-\mu x), \quad (5)$$

式中: μ 为吸收系数; x 为电离室中两个电极间的距离。

实验时样品处电离室中的电流读数为 $4.8 \times$

10^{-9} A, X 光在空气中的线性吸收系数 μ 约为 0.01188 cm^{-1} 。200 mA 束流时的光子通量 N_1 为

$$N_1 = \frac{I_0 \varepsilon_0}{eE [1 - \exp(-\mu x)]} = \frac{4.8 \times 10^{-9} \times 34.4}{1.6 \times 10^{-19} \times 8000 \times [1 - \exp(-0.01188 \times 1)]} = 1.09 \times 10^{10} \text{ photon} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (6)$$

300 mA 束流时的光子通量 N_2 为

$$N_2 = (300/I) \cdot N_1, \quad (7)$$

式中: I 为测试时的电流强度。 N_1 换算到 300 mA 电流强度下的光通量的值为 $N_2 = 1.64 \times 10^{10} \text{ photon/s@8 keV}$ 。

4.4 空间分辨率

使用分辨率靶作为样品, 放置在 TXM 系统的样品处, 通过观察星条靶靶线测试系统的空间分辨率。标准分辨率测试卡 (Carl Zeiss AG, X30-30-2) 的最小尺寸为 30 nm。将单色器能量设置为 8 keV, 样品处放

置 X 射线分辨率测试卡, 调节 TXM 成像系统中各元件的距离和姿态, 对分辨率靶进行成像, 利用功率谱 (PSD) 对成像结果进行分析, 即对图片进行二维傅里叶变换后, 对固定径向频率处方位角 (沿圆周) 的二维功率谱强度进行积分, 得到成像空间分辨率^[17]。

星条靶测试结果如图 7 所示。图 7(a) 为曝光时间为 60 s 时的星条靶成像结果。测试结果显示, 相邻明暗条纹间距为 30 nm 的靶线能被清晰分辨。图 7(b) 为功率谱分析曲线, 截距的空间频率为 $25.5 \text{ } \mu\text{m}^{-1}$, 计算后得到的空间分辨率为 19.6 nm。

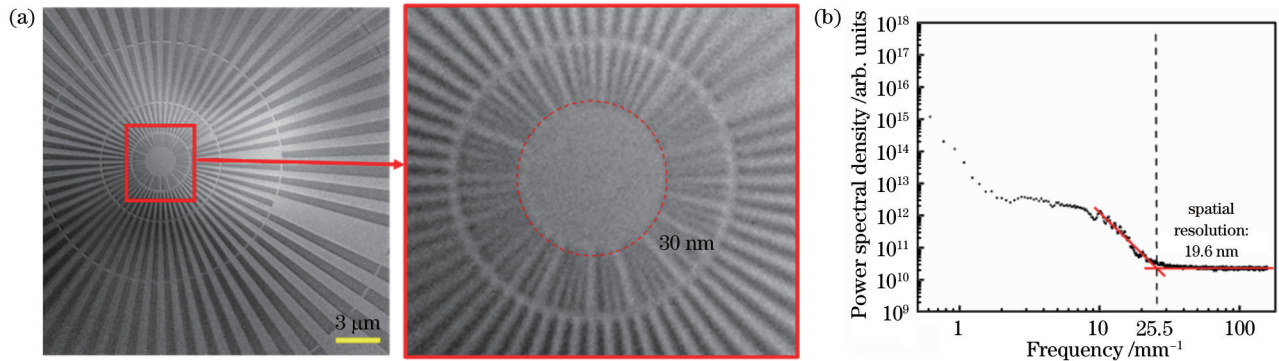


图 7 星条靶成像结果和功率谱分析曲线。(a) 星条靶成像图; (b) 功率谱分析曲线

Fig. 7 Image result and power spectral density curve of start bar. (a) Image result of start bar; (b) power spectral density curve

上海同步辐射光源纳米三维成像线站基于自主研发的单毛细管聚焦元件、TXM 机械系统、纳米 CT 控制及数据采集软件, 完成了能量范围、能量分辨率、样品处光通量和空间分辨率等设计指标的检测。单色光能量实际检测范围为 5~14 keV, 达到设计要求。8 keV 实际能量分辨率为 1.83×10^{-4} , 优于设计的分辨率 (5.0×10^{-4})。实际样品处光通量为 $1.64 \times 10^{10} \text{ photon/s@8 keV}$, 高于设计值 ($5 \times 10^9 \text{ photon/s@8 keV}$)。实际空间分辨率为 19.6 nm, 高于设计的 20 nm 空间分辨率。各项指标的实际测量结果均达到或优于理论设计指标。

5 结 论

上海同步辐射光源纳米三维成像光束线站各项指标的实测值均达到并部分优于设计指标, 是国际上首条基于弯铁光源并实现 20 nm 分辨率成像的光束线站。

上海同步辐射光源纳米三维成像线站主要实验方法为 TXM 和纳米 CT, 具有三维成像分析的优势。同时, TXM、纳米 CT 与 XRF、XANES 方法进行结合, 具

有元素分析优势。该线站于 2022 年对用户开放使用, 其成像技术将会被应用到更加广阔的科研领域中, 并推动相关科研工作的进步。

致谢 该光束线安装和调试过程得到了上海同步辐射光源束线工程和其他同事的大力支持, 在此表示感谢。同时, 感谢上海科技大学佟亚军博士的倾力支持。

参 考 文 献

- [1] 李凡, 康乐, 杨福桂, 等. 基于 X 射线近场散斑的波前检测技术研究现状[J]. 光学学报, 2022, 42(8): 0800002. Li F, Kang L, Yang F G, et al. Present research status of X-ray near-field speckle based wavefront metrology[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0800002.
- [2] 杨霞, 李俊琴, 曹杰峰, 等. 基于同步辐射的时间分辨 X 射线铁磁共振方法[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1534002. Yang X, Li J Q, Cao J F, et al. Time-resolved X-ray ferromagnetic resonance method based on synchrotron radiation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1534002.
- [3] 骆钧尧, 郭智, 黄浩, 等. 多层膜光栅衍射效率的同步

- 辐射研究[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1405001.
- Luo J Y, Guo Z, Huang H, et al. Synchrotron radiation research on diffraction efficiency of multilayer coated grating[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1405001.
- [4] Chen-Wiegart Y C K, Cronin J S, Yuan Q X, et al. 3D non-destructive morphological analysis of a solid oxide fuel cell anode using full-field X-ray nano-tomography[J]. Journal of Power Sources, 2012, 218: 348-351.
- [5] Chen T Y, Chen Y T, Wang C L, et al. Full-field microimaging with 8 keV X-rays achieves a spatial resolutions better than 20 nm[J]. Optics Express, 2011, 19(21): 19919-19924.
- [6] Li W J, Wang N, Chen J, et al. Quantitative study of interior nanostructure in hollow zinc oxide particles on the basis of nondestructive X-ray nanotomography[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(5): 053108.
- [7] Liu X Y, Ronne A, Yu L C, et al. Formation of three-dimensional bicontinuous structures via molten salt dealloying studied in real-time by *in situ* synchrotron X-ray nano-tomography[J]. Nature Communications, 2021, 12: 3441.
- [8] Andrews J C, Pianetta P, Meirer F, et al. Hard X-ray full field nano-imaging of bone and nanowires at SSRL [C]. AIP Conference Proceedings, 2010, 1234: 79-82.
- [9] 袁清习, 黄万霞, 洪友丽, 等. BSRF-4W1A 纳米成像光束线调试[J]. 核技术, 2010, 33(10): 721-724.
- Yuan Q X, Huang W X, Hong Y L, et al. Adjustment and test of the nano-imaging beamline at BSRF[J]. Nuclear Techniques, 2010, 33(10): 721-724.
- [10] Weker J N, Liu N, Misra S, et al. *In situ* nanotomography and operando transmission X-ray microscopy of micron-sized Ge particles[J]. Energy & Environmental Science, 2014, 7(8): 2771-2777.
- [11] Nelson J, Misra S, Yang Y, et al. In operando X-ray diffraction and transmission X-ray microscopy of lithium sulfur batteries[J]. Journal of the American Chemical Society, 2012, 134(14): 6337-6343.
- [12] Wang S X, Wang D J, Wu Q, et al. 3D imaging of a rice pollen grain using transmission X-ray microscopy[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2015, 22(4): 1091-1095.
- [13] 安汉文, 莫生凯, 李梦璐, 等. 同步辐射多模态成像技术在储能电池领域的研究进展[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(3): 834-851.
- An H W, Mo S K, Li M L, et al. Research progress of synchrotron radiation multimodal imaging technology in field of energy storage batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(3): 834-851.
- [14] Yang Y, Xu Z R, Steiner J D, et al. Quantitative probing of the fast particle motion during the solidification of battery electrodes[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(8): 081904.
- [15] 陶芬, 王玉丹, 任玉琦, 等. X射线纳米成像单毛细管椭球镜的设计与检测[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1034002.
- Tao F, Wang Y D, Ren Y Q, et al. Design and detection of ellipsoidal mono-capillary for X-ray nano-imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1034002.
- [16] 洪友丽. X射线相衬显微成像方法研究及其应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
- Hong Y L. X-ray phase contrast imaging research and application in X-ray microscopy[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [17] Ge M Y, Coburn D S, Nazaretski E, et al. One-minute nano-tomography using hard X-ray full-field transmission microscope[J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(8): 083109.