

# 光学学报

## 用于行星原位分析的微型微焦斑 X 射线激发源

曹阳<sup>1\*</sup>, 桑鹏<sup>1</sup>, 李保权<sup>1,2\*\*</sup>, 牟欢<sup>1</sup>, 李海涛<sup>1,2</sup>, 王欢<sup>1,2</sup>, 李帆<sup>1,2</sup>, 刘亚宁<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院国家空间科学中心复杂航天系统电子信息技术重点实验室, 北京 100190;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 基于微型 X 射线闭管的 X 射线荧光谱仪是深空探测新一代元素就位分析技术, 研制了一款微型微焦斑 X 射线闭管作为 X 射线荧光分析的激发源。设计了一种新型的单极静电聚焦透镜, 仿真模拟了电子聚焦光学结构尺寸对电子束运动轨迹的影响, 并对静电聚焦结构的形状和尺寸进行了优化。完成了微型一体化 X 射线源的加工和装调, 搭建了 X 射线源性能测试装置。微型一体化 X 射线源工作电压 2~50 kV、X 射线强度不稳定性为 0.3%、高压不稳定性为 0.21%。在高压 50 kV、电子电流 50  $\mu$ A 的情况下, 微型一体化 X 射线源的总功耗 5 W, 焦斑尺寸 177  $\mu$ m  $\times$  451  $\mu$ m, 可以满足深空探测行星表面物质成分原位分析需求。

**关键词** 元素原位分析; 微型 X 射线闭管; 微焦斑; 静电聚焦透镜

中图分类号 P691 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230646

### 1 引言

深空探测是当今世界高新科技中极具挑战性的领域之一, 行星或者小天体生命信息探测是深空探测领域的重要发展方向。一般而言, 行星土壤里有可能保存着生命印迹或者蕴藏着行星过去宜居性的重要线索, 这些都是研究行星起源或者行星历史的重要信息, 因此行星土壤化学成分测量是行星探测的基本需求<sup>[1-2]</sup>。

人类以往实施的深空探测任务中, 开展化学成分测量主要依赖基于放射性同位素激活技术的 Alpha 粒子 X 射线谱仪 (APXS)<sup>[3-6]</sup>。虽然 APXS 的应用获得了成功, 但该技术也存在着测量元素种类有限、测谱时间长、辐射泄漏风险高等缺陷<sup>[7-8]</sup>。近些年来, 伴随着微型 X 射线源技术的快速发展, 基于微型 X 射线源的 X 射线荧光谱仪正成为深空探测新一代元素就位分析技术<sup>[9]</sup>。

国外对微型 X 射线源的研究较早, 2000 年美国的 Moxtek 公司和 Oxford 公司分别在美国宇航局的支持下开始了微型 X 射线源的研究<sup>[10-11]</sup>, 其中 Oxford 公司研制的微焦斑钴靶 X 射线源在 2011 年发射的好奇号火星车上的 X 射线荧光谱仪中得到了应用<sup>[12]</sup>, Moxtek 公司研制的微型微焦斑 X 射线源在 2020 年发射的毅力号火星车上的 X 射线荧光谱仪中得到了应用<sup>[13]</sup>。针对后续行星探测任务的基于微型 X 射线源的 X 射线荧

光谱仪的研究还在持续进行中<sup>[9]</sup>。相比之下, 国内对微型 X 射线源的研究起步较晚, 一些研究者对微型 X 射线源的光管结构、靶材、高压电源等方面进行了研究<sup>[14-18]</sup>, 但这些研究在 X 射线闭管高压等技术指标上仍存在一定瑕疵, 技术尚不成熟, 且这些研究主要针对地面使用的便携式 X 射线荧光谱仪, 没有考虑空间应用的需求。受限于国内微型 X 射线源研究目前的进展, 2013 年发射的玉兔号月球车上的 X 射线谱仪仍使用了放射性同位素激发源<sup>[6]</sup>。

为了给我国未来的深空探测计划提供先进的载荷技术支撑, 本文对微型一体化 X 射线激发源进行了研究, 设计了一种阴极光学聚焦结构并进行了仿真模拟和实验验证, 对研制的一体化微型微焦斑 X 射线源的性能进行了测试。

### 2 微型 X 射线激发源设计与仿真

#### 2.1 微型一体化 X 射线源组成及设计

微型一体化 X 射线源中包含了微型 X 射线闭管和微型高压电源 (HVPS)。图 1 给出了微型一体化 X 射线源的结构示意图。

微型 X 射线闭管的结构组成主要包括阴极、电子光学结构、陶瓷绝缘件、透射式阳极靶, 见图 1 上方 X 射线管部分。考虑碳纳米管阴极必须在超高真空环境下使用, 对密封要求极高<sup>[19]</sup>, 并且碳纳米管阴极所需的高压电源系统较为复杂难以小型化, 因此本文采用了

收稿日期: 2023-03-08; 修回日期: 2023-03-20; 录用日期: 2023-04-03; 网络首发日期: 2023-04-13

基金项目: 民用航天技术预研项目 (20211176)、中国科学院科研仪器设备研制项目 (YZQT009)

通信作者: \*caoyang@nssc.ac.cn; \*\*lbq@nssc.ac.cn

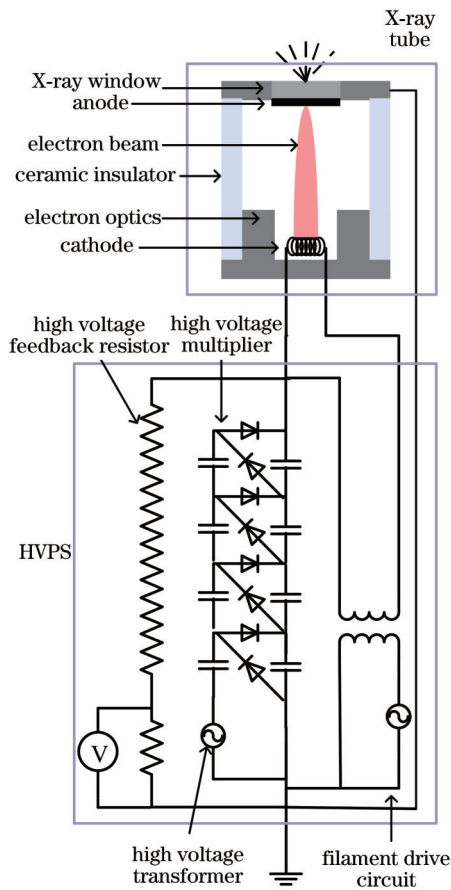


图 1 微型 X 射线源结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the miniature X-ray source

传统的热阴极设计,使用微型螺旋钨丝作为阴极电子发射源。电子聚焦结构主要起到聚焦电子束的作用,关于电子聚焦结构的设计将在 2.2 节进行详细描述。陶瓷绝缘件主要用于隔绝阴极和阳极之间的高压,相比于玻璃封装,这种金属陶瓷封装设计一方面可以满足深空探测应用中的恶劣力学环境要求,另一方面可以通过高温钎焊提高管内真空度从而增加 X 射线闭管的使用寿命。最后,阳极靶采用透射式端窗设计,在 250  $\mu\text{m}$  厚的铍窗内侧镀了一层 1  $\mu\text{m}$  厚的钨作为阳极靶,这种设计将阳极靶和 X 射线出射窗结合,可以减小 X 射线闭管的体积尺寸。该 X 射线闭管的工作原理如下:螺旋钨丝通电后加热到一定温度发射电子,产生的电子束经电子聚焦结构聚焦后,在阴极和阳极之间的高压电场作用下加速运动到阳极,轰击钨靶产生包括韧致辐射和特征射线在内的 X 射线,最后 X 射线穿过钨靶和铍窗透射出去。

微型高压电源的设计基于 Cockcroft-Walton (CW) 高压倍增整流器,结构如图 1 下方 HVPS 部分所示,它用于产生高压并为阴极钨丝提供驱动电流。为了系统小型化和安全性方面的考虑,高压电源采用了浮地负高压的设计,即高压电源产生负高压为 X 射线闭管阴极供电, X 射线闭管阳极接地。CW 高压倍增

整流器由排列成梯状结构的电容和二极管构成,可以将由高压变压器产生的数千伏交流高压整流放大,输出数万伏以上的直流高压。该设计的一个重要结构是高压反馈回路,通过高压反馈回路可以对高压进行监测,再通过控制系统对高压进行实时控制,从而获得稳定准确的高压。另一个重要的部件是灯丝驱动电路,由于阴极灯丝处于负高压,所以灯丝驱动电路采用交流电驱动设计,通过隔离变压器在隔离变压器次级端产生浮地高压,并加载在 X 射线闭管阴极丝两端。最后,为了不产生高压放电现象,微型高压电源和微型 X 射线闭管需要用高压绝缘胶进行灌封。

## 2.2 X 射线闭管电子聚焦结构与仿真

X 射线闭管的焦斑尺寸关系到微束 X 射线荧光分析等应用的精度,尤其是利用毛细管透镜将 X 射线进行远端聚焦时,聚焦尺寸越小, X 射线的能量密度越大<sup>[20]</sup>。考虑到微型 X 射线闭管体积尺寸的约束,一般采用被动聚焦的方式进行电子束聚焦<sup>[21]</sup>,即 X 射线闭管除阴极和阳极外没有额外的电极。由于缺少聚焦电极,被动聚焦主要靠 X 射线闭管阴极结构的设计来实现,因此阴极结构设计是本研究的一项关键内容。

本文设计了一种新型阴极光学结构,其结构如图 2 所示。该结构包括一个电子抑制槽和两个正交堆叠的聚焦槽。其中电子抑制槽位于阴极丝底部,它可以将热阴极丝向底部方向发射的电子吸收,从而避免这部分难以聚焦的电子到达阳极对聚焦尺寸产生影响。两个聚焦槽位于阴极丝和阳极之间,通过调节两个聚焦槽的长宽可以对电子束不同方向的聚焦位置进行调节,从而达到调节聚焦尺寸的目的。

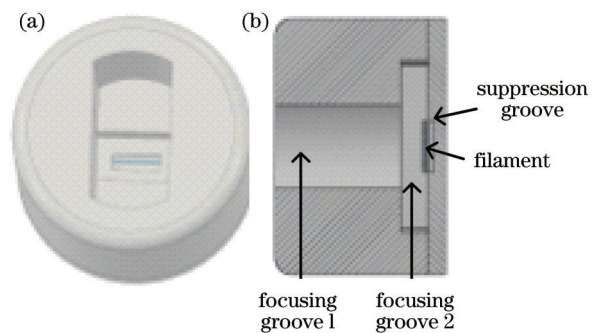


图 2 电子聚焦结构示意图。(a)整体结构;(b)半剖视图

Fig. 2 Schematic diagram of the electron beam focusing structure. (a) Overall structure; (b) half section

为了达到较好的聚焦效果,利用多物理场仿真软件 COMSOL 的电磁学模块与粒子追踪模块对设计的电子聚焦结构进行了电子光学仿真。仿真设置阴极负高压为 50 kV,阴极电子源为螺旋钨丝,钨丝直径为 30  $\mu\text{m}$ ,螺旋直径 150  $\mu\text{m}$ ,螺旋长度 2 mm,初始发射电子的速度与能量分布依据 Richardson 热电子发射公式。经过了大量的仿真优化,最终确定了光学结构的尺寸设计,图 3 为最终电子光学的仿真结果。

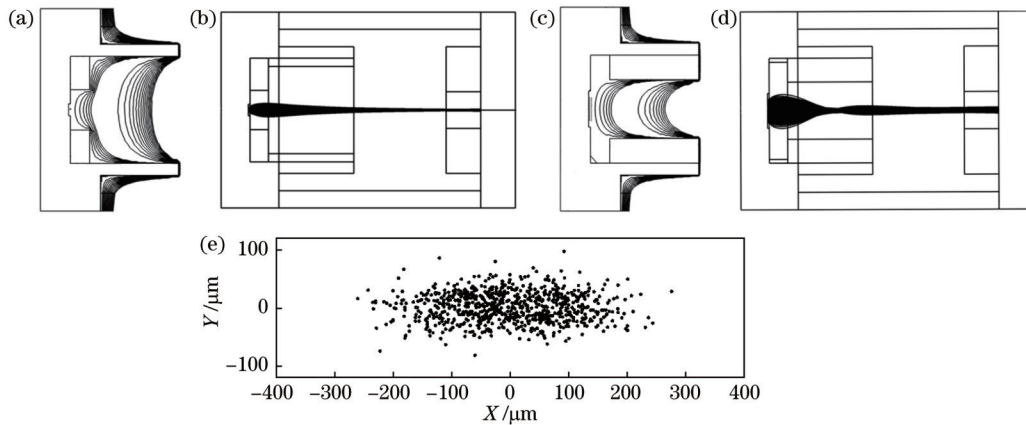


图3 电子光学仿真结果。(a) YZ平面电势等值线图;(b) YZ平面电子束运动轨迹;(c) XZ平面电势等值线图;(d) XZ平面电子束运动轨迹;(e) 焦斑二维位置坐标

Fig. 3 Simulation result of electric optics. (a) Voltage contour in the YZ plane; (b) electron beam trajectories in the YZ plane; (c) voltage contour in the XZ plane; (d) electron beam trajectories in the XZ plane; (e) two-dimensional coordinate of focusing spot

图3(a)~(d)分别为YZ平面、XZ平面上的电势等值线图及电子束运动轨迹图,图中可以看出:YZ平面上,电子束轨迹主要受聚焦槽1的长度和聚焦槽2的宽度影响,在阳极位置聚焦;XZ平面上,电子束轨迹主要受聚焦槽1的宽度影响,在聚焦槽1内一次聚焦后,在阳极位置处再次聚焦。图3(e)为电子轰击阳极靶焦斑的二维位置坐标。光源焦斑尺寸一般用半峰全宽(FWHM)来表示,假设电子束打靶的分布为二维高斯分布,则图3(e)中的电子束焦斑总体尺寸为 $166\ \mu\text{m}$ ,考虑到图3(e)中的电子束焦斑为长条形,对X、Y方向的尺寸分别进行计算,可得电子束焦斑在X、Y方向的尺寸分别为 $227\ \mu\text{m}$ 、 $60\ \mu\text{m}$ 。

另外,上述仿真中,阴极发射的80.3%电子经电场约束到达了钨靶位置,因此该阴极结构在降低焦斑尺寸的同时,并未显著降低电子通过效率,这对降低微型X射线源的功耗有重要作用,这种结构相比限束孔结构优势比较明显。

在此基础上,仿真研究了阴极高压对焦斑尺寸的影响,结果如图4所示。从图中可以看出,阴极高压对焦斑尺寸的影响十分显著,阴极高压增大时焦斑尺寸减小。造成上述现象的主要原因是,随着阴极高压增大,初始热电子的能量离散程度相对于高压来说越来越小,因此光学系统的色差降低、焦斑尺寸变小。

### 3 实验设计与结果讨论

#### 3.1 微型一体化X射线源样机研制

根据2.1节的微型X射线闭管设计方案和2.2节仿真优化得到的电子聚焦结构尺寸,加工完成了零部件,安装在真空炉内烘烤4 h,采用一次封排完成X射线闭管的真空密封,研制完成的微型X射线闭管尺寸为 $\Phi 20\ \text{mm} \times 23\ \text{mm}$ ,如图5(a)所示。根据2.2节的微型高压电源设计方案,开发完成了电路模块,由于该

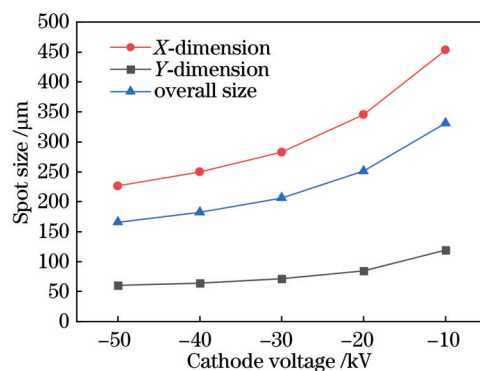


图4 焦斑尺寸与阴极电压关系仿真图

Fig. 4 Simulation result of focal spot size versus cathode voltage

高压电源的输出高达50 kV,为了避免放电现象,将其和微型X射线闭管用耐高压硅橡胶进行了一体化灌封,最终研制完成的微型一体化X射线源如图5(b)所示。研制完成的微型一体化X射线源尺寸为 $118\ \text{mm} \times 76\ \text{mm} \times 42\ \text{mm}$ ,高压设置范围为2~50 kV,在高压50 kV、管电流 $50\ \mu\text{A}$ 的状态下功率为5 W。

#### 3.2 透射钨靶谱线测试

针对不同的X射线荧光分析应用,经常需要调节X射线源高压来改变输出X射线的能谱。对于大多数应用而言,X射线源高压一般设置在40~50 kV;对于轻元素检测应用而言,X射线源高压一般设置在20 kV左右。本文研制的微型X射线源高压可在2~50 kV范围内调节,更宽的高压动态范围,能够增加X射线源在X射线探测器定标测试方面的应用需求。为了验证微型X射线源设置不同高压的能力并对其能谱进行测试,利用Amptek公司生产的硅漂移探测器(SDD)对出射X射线谱进行了测量,测量结果如图6所示。出射X射线谱由特征射线谱和韧致辐射谱组成。特征射

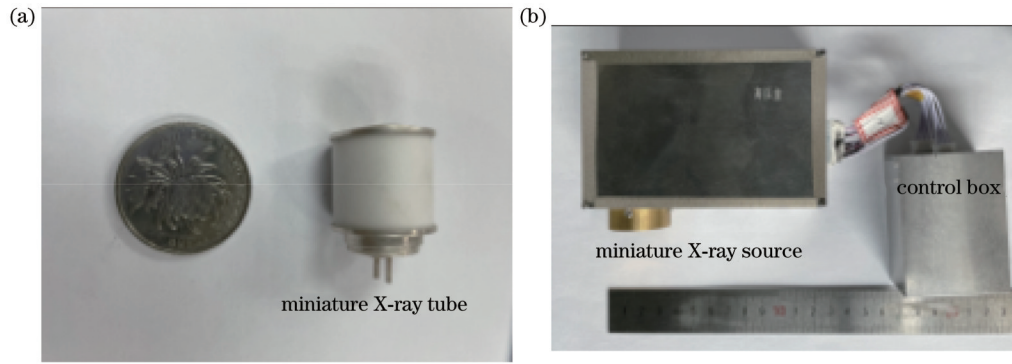


图 5 样机照片。(a)微型 X 射线闭管照片;(b)微型一体化 X 射线源照片

Fig. 5 Photographs of the prototype. (a) Photograph of miniature sealed X-ray tube; (b) photograph of integrated miniature X-ray source

线谱主要是钨的特征谱,包括  $L_i$ 、 $L_{\alpha 1}$ 、 $L_{\alpha 2}$ 、 $L_{\beta 1}$ 、 $L_{\beta 2}$  等<sup>[22]</sup>。韧致辐射产生 X 射线的最大能量由高压决定<sup>[23]</sup>,图 6 中不同高压的能谱验证了研制的微型 X 射线源调节不同高压的能力。

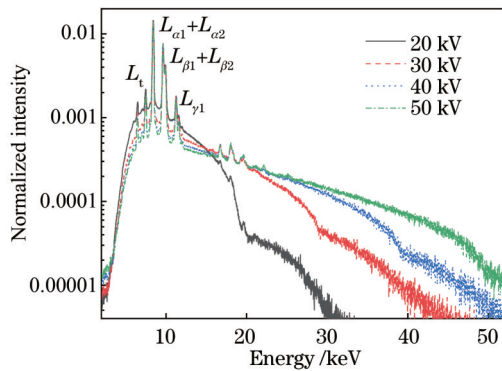


图 6 钨靶 X 射线谱

Fig. 6 X-ray spectrum of tungsten target

### 3.3 输出 X 射线稳定性测试

X 射线源输出 X 射线的稳定性直接影响到 X 射线荧光分析的分析精度,因此有必要对微型 X 射线源的输出稳定性进行测试。X 射线输出稳定性主要包括两个方面:强度稳定性和高压稳定性。

强度稳定性可以使用 SDD 探测器进行测试。保持微型 X 射线源开启,设置高压为 35 kV,电子电流为 30  $\mu$ A,使用 SDD 探测器采样获得微型 X 射线源的输出强度,每次采样时长 5 s,采样间隔 3 s,测量时长共 45 min,测试结果如图 7 所示。图 7 的测试结果显示输出 X 射线强度随时间有一定增长的趋势,这主要是由于长时间工作微型 X 射线源的温度有一定升高,但在 45 min 的测试时间内,输出 X 射线强度的不稳定性为 0.30%,优于 Moxtek 公司生产的微型 X 射线源 0.45% 的强度稳定性指标<sup>[21]</sup>,能够满足行星表面元素成分原位分析的需求。

高压稳定性可以通过对输出 X 射线的能谱进行测量得到。因为韧致辐射的截止能量由 X 射线源的高压

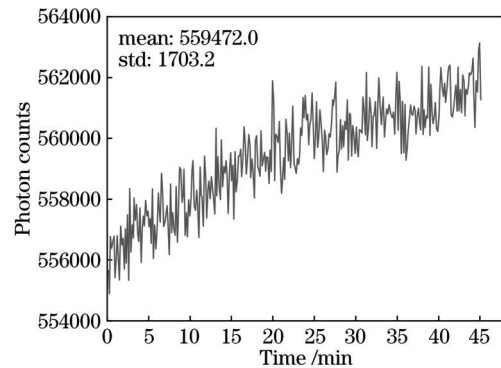


图 7 输出 X 射线强度稳定性测量

Fig. 7 Stability measurement result of the X-ray flux

决定,所以只要通过合适的算法拟合出韧致辐射的截止能量,就可以得到 X 射线源的高压值。韧致辐射边缘位置附近的 X 射线强度分布可以用分段线性函数近似描述为

$$f(x) = \begin{cases} k(x - E_{HV}) & , x \leq E_{HV} \\ 0 & , x > E_{HV} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x$ 是光子能量; $f(x)$ 为光子能量为 $x$ 的 X 射线强度; $E_{HV}$ 为最大韧致辐射能量,由高压决定; $k$ 为线性函数的斜率。

使用式(1)中对韧致辐射边缘位置附近的能谱进行最小二乘拟合,拟合得到的参数  $E_{HV}$  即为韧致辐射截止能量。在 X 射线源和 SDD 探测器之间放置 5 mm 厚的铝板过滤低能 X 射线,用 SDD 探测器采样获得微型 X 射线源的输出能谱。保持微型 X 射线源开启,设置高压为 35 kV,电子电流为 20  $\mu$ A,使用 SDD 探测器采样获得微型 X 射线源输出能谱,每次采样时长 10 s,采样间隔 30 s,测量时长共 45 min,测试结果如图 8 所示。图 8(a)是某次采样的韧致辐射边缘位置能谱及拟合结果,图 8(b)是高压随时间变化的曲线,结果显示,X 射线源高压的标准差为 74 V,不稳定性为 0.21%,能够满足行星表面元素成分原位分析的需求。

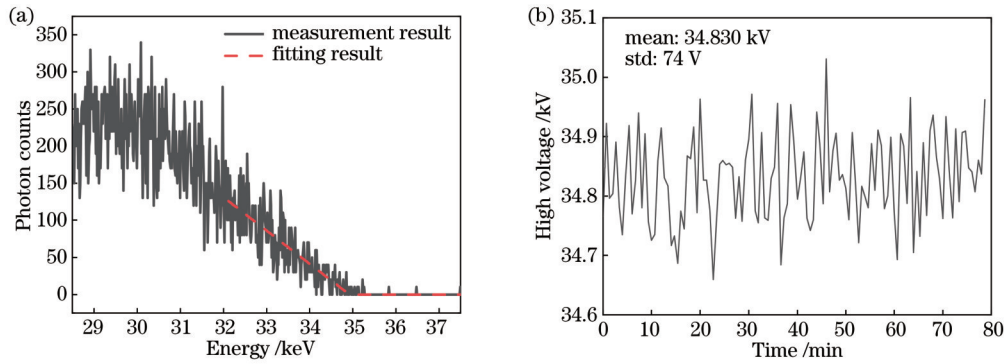


图 8 高压稳定性测量结果。(a) 韧致辐射边缘谱和拟合结果；(b) 高压随时间变化图

Fig. 8 High voltage stability measurement result. (a) Bremsstrahlung edge spectrum and fitting result; (b) high voltage changes over time

### 3.4 X 射线源焦斑尺寸测试

为了验证本文设计的电子聚焦结构的性能,对微型 X 射线源的焦斑尺寸进行了测试。小孔成像是测量 X 射线光斑尺寸最常用的方法之一<sup>[24]</sup>,它通过直接测

量 X 射线源透过小孔在投影面所成的像的尺寸来计算光源的尺寸。本文测量焦斑尺寸使用了厚度 200  $\mu\text{m}$ 、孔直径 50  $\mu\text{m}$  的钨板,并用 Varex 公司的平板探测器来接收光源投影像,最终测试结果如图 9 所示。

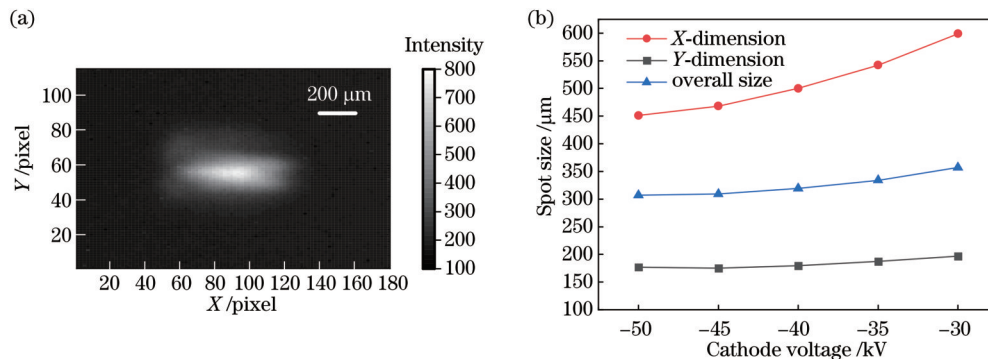


图 9 焦斑尺寸实验测试结果。(a) 50 kV 高压时 X 射线光斑小孔成像图；(b) 焦斑尺寸与阴极电压关系

Fig. 9 Spot size measurement result. (a) Pinhole camera image of the X-ray spot at 50 kV; (b) spot size versus cathode voltage

从图 9 的结果可以看出, X 射线源光斑尺寸随阴极高压的变化趋势和仿真结果类似,阴极高压增大时焦斑尺寸减小,当 X 射线源高压为 50 kV 时, X 射线光斑总体尺寸为 307  $\mu\text{m}$ , X、Y 方向的尺寸分别为 451  $\mu\text{m}$ 、177  $\mu\text{m}$ , 优于 Moxtek 公司生产的微型 X 射线源 390  $\mu\text{m} \times 340 \mu\text{m}$  的光斑尺寸<sup>[23]</sup>。和仿真结果相比,实验测得的 X 射线光斑尺寸稍大一些,造成这一现象的可能原因包括:1) 仿真中没有充分考虑阴极丝发光尺寸误差、结构加工安装误差、阴极丝温度分布等因素的影响;2) 小孔成像法本身具有一定的误差,如非理想的小孔会导致光斑尺寸测量结果偏大。

## 4 结 论

本文提出了一种新型电子聚焦光学结构,并基于此研制了微型一体化微焦斑 X 射线源,实现了高压 50 kV、焦斑尺寸 177  $\mu\text{m} \times 451 \mu\text{m}$ 、输出强度不稳定性 0.30%、输出高压不稳定性 0.21% 的技术指标,验证了新型电子聚焦光学结构的性能。所研制的微型一体

化 X 射线源对于我国开展行星表面物质成分原位分析研究具有重要意义。下一步将通过结构优化设计来进一步减小微型一体化 X 射线源的体积尺寸以适应不同空间应用的需求。

### 参 考 文 献

- [1] Rossi A P, van Gasselt S. Planetary geology[M]. Cham: Springer, 2018.
- [2] Young K E, Evans C A, Hodges K V, et al. A review of the handheld X-ray fluorescence spectrometer as a tool for field geologic investigations on Earth and in planetary surface exploration[J]. Applied Geochemistry, 2016, 72: 77-87.
- [3] Clark B C III, Baird A K, Rose Jr H J, et al. The viking X ray fluorescence experiment: analytical methods and early results[J]. Journal of Geophysical Research, 1977, 82(28): 4577-4594.
- [4] Klingelhöfer G, Brückner J, D'uston C, et al. The Rosetta alpha particle X-ray spectrometer (APXS) [J]. Space Science Reviews, 2007, 128(1): 383-396.
- [5] Shanmugam M, Murty S V S, Acharya Y B, et al. Alpha particle X-ray spectrometer (APXS) on-board chandrayaan-2 rover[J]. Advances in Space Research, 2014, 54(10): 1974-1984.
- [6] Chen D Y, Wu J, Hu Y M, et al. Design and experimental verification of Chang'E-3 moon-night survival device for APXS

- [J]. Chinese Astronomy and Astrophysics, 2016, 40(3): 414-424.
- [7] Potts P J, West M. Portable X-ray fluorescence spectrometry: capabilities for in situ analysis[M]. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2008.
- [8] Gellert R, Campbell J L, King P L, et al. The alpha-particle-X-ray-spectrometer (APXS) for the Mars science laboratory (MSL) rover mission[EB/OL]. [2022-11-09]. <https://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2009/pdf/2364.pdf>.
- [9] Beck A W, Peplowski P N, Yokley Z W. A miniaturized XRF instrument for *in situ* planetary exploration: the active X-ray spectrometer (AXRS)[J]. Planetary and Space Science, 2020, 190: 104990.
- [10] Cornaby S, Reyes-Mena A, Pew H K, et al. An XRD/XRF instrument for the microanalysis of rocks and minerals[J]. Measurement Science & Technology, 2001, 12(6): 676-683.
- [11] Sarrazin P, Blake D, Delzeit L, et al. Carbon-nanotube field emission X-ray tube for space exploration XRD/XRF instrument[J]. Advances in X-ray Analysis, 2004, 47: 232-239.
- [12] Sarrazin P, Blake D, Feldman S, et al. Field deployment of a portable X-ray diffraction/X-ray fluorescence instrument on Mars analog terrain[J]. Powder Diffraction, 2005, 20(2): 128-133.
- [13] Allwood A, Clark B, Flannery D, et al. Texture-specific elemental analysis of rocks and soils with PIXL: the planetary instrument for X-ray lithochemistry on Mars 2020[C]//2015 IEEE Aerospace Conference, March 7-14, 2015, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2015.
- [14] 曾国强, 刘玺尧, 罗群, 等. 低纹波微型 X 射线管高压电源的研制[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(2): 366-371.
- Zeng G Q, Liu X Y, Luo Q, et al. High voltage power supply development for micro X-ray tube of low ripple[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(2): 366-371.
- [15] 谷懿, 熊盛青, 葛良全, 等. 微型 X 射线管出射谱特征研究及 Be 窗厚度确定[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(1): 252-256.
- Gu Y, Xiong S Q, Ge L Q, et al. Research on spectral characteristic of miniature X-ray tube and determination of beryllium window thickness[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(1): 252-256.
- [16] 杨强, 葛良全, 胡青云, 等. 端窗透射微型 X 光管的结构优化[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(10): 80-85.
- Yang Q, Ge L Q, Hu Q Y, et al. Structural optimization of end-window transmission micro X-ray tube[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(10): 80-85.
- [17] 王雷, 张庆贤, 葛良全, 等. Al 窗 Ag 靶微型透射式 X 射线管模拟与性能分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(10): 2891-2894.
- Wang L, Zhang Q X, Ge L Q, et al. Analyze output spectrum in miniature transmission X-ray tube of aluminum window and silver target by MC simulation[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(10): 2891-2894.
- [18] 史丽娜, 刘俊标, 牛耕, 等. 棒阳极 X 射线源聚焦系统的电子光学设计[J]. 光学学报, 2022, 42(22): 2234001.
- Shi L N, Liu J B, Niu G, et al. Electro-optical design of focusing system of rod anode X-ray source[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(22): 2234001.
- [19] Young C H, Hwa S C, UK K J. Development of new X-ray source based on carbon nanotube field emission and application to the non destructive imaging technology[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009, 56(3): 1297-1300.
- [20] 孙天希. 毛细管 X 射线透镜技术及其应用[J]. 光学学报, 2022, 42(11): 1134002.
- Sun T X. Capillary X-ray lens technology and its application[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(11): 1134002.
- [21] Crocombe R A, Leary P E, Kamrath B. Portable spectroscopy and spectrometry[M]. Hoboken: Wiley, 2021.
- [22] 牟欢, 李保权, 曹阳. 基于空间应用的透射式微型微束调制 X 射线源[J]. 物理学报, 2016, 65(14): 14073.
- Mou H, Li B Q, Cao Y. Transmission-type miniature micro-beam modulated X-ray source based on space application[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(14): 14073.
- [23] Poludniowski G G, Evans P M. Calculation of X-ray spectra emerging from an X-ray tube. Part II. X-ray production and filtration in X-ray targets[J]. Medical Physics, 2007, 34(6): 2175-2186.
- [24] 李勤, 王毅, 刘云龙, 等. 针孔法测量 X 光源焦斑尺寸[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(4): 044007.
- Li Q, Wang Y, Liu Y L, et al. X-ray spot size measurement with pinhole[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(4): 044007.

## Miniature Micro-Focus X-Ray Source for *In-Situ* Elemental Analysis in Planetary Exploration

Cao Yang<sup>1\*</sup>, Sang Peng<sup>1</sup>, Li Baoquan<sup>1,2\*\*</sup>, Mou Huan<sup>1</sup>, Li Haitao<sup>1,2</sup>, Wang Huan<sup>1,2</sup>, Li Fan<sup>1,2</sup>, Liu Yaning<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Electronics and Information Technology for Space Systems, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

### Abstract

**Objective** The measurement of the chemical composition of rock and soil on planetary surfaces is of great significance to the study of the composition, geological history, and life information of planets, and it is a basic requirement for planetary exploration. In the deep space exploration missions carried out by humans in the past, chemical composition measurement mainly relies on the Alpha particle X-ray spectrometer (APXS) based on radioisotope activation technology. Although the APXS has been successfully applied, the technology also has shortcomings such as limited types of measurement elements, long spectrum measurement time, and high radiation leakage risks. In recent years, with the rapid development

of miniature X-ray source technology, X-ray fluorescence analysis instruments using miniature X-ray tubes as excitation sources are becoming a new generation of *in-situ* elemental analysis technology in deep space exploration. NASA has successfully used a miniature micro-focus X-ray tube in the X-ray fluorescence spectrometer on the Curiosity Mars rover launched in 2020. In contrast, the research on miniature X-ray sources in China starts relatively late. Limited by the research progress of miniature X-ray sources, there is currently no space X-ray fluorescence spectrometer based on miniature X-ray tubes in China. In order to provide technical support for China's future deep space exploration program, an integrated miniature X-ray source is developed as the excitation source for X-ray fluorescence analysis.

**Methods** The integrated miniature X-ray source includes a miniature micro-focus X-ray tube and a miniature high-voltage power supply (HVPS). In view of the requirements of resources and mechanical properties in the aerospace environment, the miniature micro-focus X-ray tube is designed as an end-window transmission-target metal-ceramic X-ray tube using heated tungsten filament. The miniature HVPS is a negative HVPS using a Cockcroft Walton voltage multiplier. Due to the demand for X-ray tubes, isolation transformers for filament power supply and high-voltage feedback circuits have been added. A new type of electrostatic focusing lens used for unipolar X-ray tubes is designed. The passive electron optics design is achieved by shaping of metal components of the tube. The structure of the electrostatic focusing lens includes an electron suppression groove and two orthogonal stacked focusing grooves. The electron suppression groove located under the tungsten wire can absorb the electrons emitted by the tungsten wire towards the bottom, so as to prevent these electrons that are difficult to focus from reaching the anode. The two focusing grooves are located between the filament and the anode. The focal spot size of the electron beam can be adjusted by changing the length and width of the two focusing grooves.

**Results and Discussions** The optimum shape of the metal components of the electrostatic focusing lens is simulated by using charged particle optical simulation software. Finally, when the high voltage is 50 kV, the simulated focal spot size, or the full width at half maximum (FWHM), of  $60\ \mu\text{m} \times 227\ \mu\text{m}$  is obtained. The sealed X-ray tube is made after structural processing and vacuum sealing. After that, the X-ray tube and the HVPS are potted in a highly insulating material to prevent arcing (Fig. 5). The size of the developed miniature integrated X-ray source is  $118\ \text{mm} \times 76\ \text{mm} \times 42\ \text{mm}$ . An X-ray source performance testing platform is set up. The X-ray energy spectrum test results show that the working voltage of the miniature integrated X-ray source is adjustable between 2–50 kV (Fig. 6). The intensity stability test results show that the output X-ray intensity increases with time, which is mainly caused by the increase in temperature of the miniature X-ray source after working for a long time. During a test lasting for 45 min, the output X-ray intensity instability is 0.30% (Fig. 7). The high voltage instability is 0.21% (Fig. 8). In order to verify the performance of the new electrostatic focusing lens designed in this paper, the focal spot size of the miniature X-ray source is tested by using the pinhole imaging method. The variation of X-ray source spot size with high voltage is similar to the simulation results. When the high voltage increases, the focal spot size decreases. When the high voltage of the X-ray source is 50 kV, the focal spot size (or FWHM) is  $177\ \mu\text{m} \times 451\ \mu\text{m}$  (Fig. 9). When the high voltage is 50 kV and the tube current is 50  $\mu\text{A}$ , and the total power consumption of the X-ray source is 5 W.

**Conclusions** In this paper, a new type of electrostatic focusing optical structure is proposed. On this basis, a miniature integrated micro-focus X-ray source is developed. The test results verify the performance of the new electrostatic focusing structure and the miniature integrated micro-focus X-ray source. The developed miniature integrated X-ray source can provide load technical support for China's future planetary exploration program. The development of the miniature integrated micro-focus X-ray source is of great significance for China to carry out *in-situ* analysis of planetary surface material composition. In the future, we will further reduce the size of the miniature integrated micro-focus X-ray source through structural optimization design to meet the needs of different space applications.

**Key words** *in-situ* elemental analysis; miniature sealed X-ray tube; micro-focus; electrostatic focusing lens