

文章编号: 1007-4627(2007)03-0214-04

高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{28+}$ 与 Au 和 Mo 表面作用产生的 X 射线谱*

梁昌慧^{1,2}, 张小安^{2,3}, 肖国青³

(1 西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710072;

2 咸阳师范学院物理学系, 陕西 咸阳 712000;

3 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 研究了高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{28+}$ 轰击金属 Au 和 Mo 表面产生的特征 X 射线谱。实验结果表明, 在入射离子的电荷态和能量相同的条件下, 对于核电荷数较小、原子质量较轻的靶原子, 只有其内壳层的电子才能被激发而产生 X 射线, 而核电荷数较大、原子质量较重的靶原子只有其较外壳层的电子能被激发而产生 X 射线。特征 X 射线的产额随入射离子动能的增加而增加。

关键词: 高电荷态离子; X 射线; 产额

中图分类号: O562.3 **文献标识码:** A

1 引言

高电荷态离子与固体表面相互作用的实验研究, 有助于研究高电荷态离子接近表面和进入固体中离子中性化过程的动力学机理。高电荷态离子与固体表面相互作用过程中, 势能的沉积和 X 射线发射是研究势能转移到表面过程的重要手段^[1]。电子回旋共振离子源可提供高电荷态的离子束流, 离子的核外大部分电子轨道处于空置状态, 根据经典过垒模型(classical over-barrier model), 在其逼近金属表面过程中, 当运动到临界距离时, 入射离子与金属表面间的势垒高度低于费米面, 金属导带的电子会共振电离或共振转移到入射离子的高激发态, 形成空心原子。空心原子通过自电离、俄歇过程等方式退激, 发射大量的电子和特征 X 射线, 并在 fs 时间内将几十到几百 keV 的能量沉积在固体表面 nm 空间尺度范围内, 使入射离子和靶原子激发和离化^[2]。入射离子激发靶利用的不是自身的动能而是剥离电荷后所携带的势能, 这使低速高电荷离子与固体靶作用呈现出许多新的特征^[3]。目前, 对高电荷态离子与固体表面相互作用发射 X 射线的研究在材料微结构分析与修正、微型 X 射线源和 X

射线激光材料等方面具有重要意义^[4]。

本文报道在兰州重离子加速器国家实验室利用低速高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{28+}$ 轰击金属 Au 和 Mo 表面, 靶原子受激发产生的特征 X 射线谱的实验结果。结果表明, 在入射离子的电荷态和能量相同的条件下, 对于核电荷数较小、原子质量较轻的靶原子能够激发内壳层的电子而产生 X 射线, 而核电荷数较大、原子质量较重的靶原子只能有较外壳层的电子被激发而产生 X 射线。特征 X 射线的产额随入射离子动能的增加而增加。

2 实验装置和测量方法

图 1 给出了实验平台的示意图, 高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{28+}$ 由兰州重离子加速器电子回旋共振离子源(Electron Cyclotron Resonance Ion Source, 简称 ECR 源)提供, 束流在不同的引出电压下引出, 利用 90° 偏转分析磁铁将确定电荷态的离子引入原子物理实验平台, 然后经过四极透镜和光栏的聚焦准直, 离子进入内部具有电磁屏蔽功能的超高真空(约 10^{-5} mPa)靶室, 与样品表面相互作用。

在本实验中, 束斑直径可控制在 5 mm 范围

* 收稿日期: 2006-12-07; 修改日期: 2007-05-22

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10574132, 10405025); 陕西省教育厅专项基金资助项目(04JK300); 咸阳师范学院科研基金资助项目(05XSYK103)

作者简介: 梁昌慧(1973-), 女(汉族), 陕西武功人, 讲师, 硕士研究生, 从事电路与系统的教学与研究;

E-mail: liangchanghui73@163.com

内, 束流强度为 nA 量级, 离子以 45° 方向斜入射于经过表面净化处理的化学纯度为 99.9% 的 Au 和 Mo 固体表面, 其表面积为 19 mm × 24 mm, 厚度为 0.1 mm。

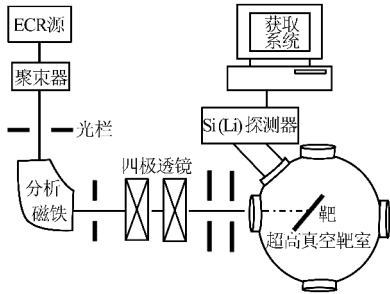


图 1 兰州重离子加速器国家实验室 ECR 源原子物理实验平台示意图

利用 Si(Li) 探测器对入射离子与固体表面相互作用产生的 X 射线谱进行测量。实验前利用标准的放射源²⁴¹Am 和⁵⁵Fe 对探测器进行了刻度, 其能量探测范围为 1—60 keV, 当 X 射线能量为 5.89 keV 时, 能量分辨为 0.16 keV, 相对探测效率为 93%。实验中, 探测器与入射束流方向成 45° 角, 与靶表面垂直; 探测口是厚度为 0.05 mm 的 Be 窗。当 X 射线能量为 3 keV 时, 该 Be 窗的透射率约为 83%。探测器口径为 10 mm, 距离靶点 80 mm, 探测时间为 5 400 s。图 2 给出了用标准放射源²⁴¹Am 和⁵⁵Fe 对探测器的刻度谱。

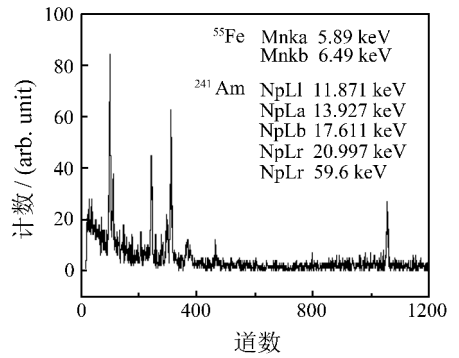


图 2 用标准放射源²⁴¹Am 和⁵⁵Fe 对探测器的刻度谱

3 实验结果与讨论

3.1 动能不同的离子激发 Au 的 X 射线谱

图 3(a), (b) 和 (c) 给出了动能分别为 400, 500 和 600 keV 的¹²⁹Xe²⁸⁺ 轰击 Au 表面激发的 X 射线谱, 经 GaussAmp 拟合 (拟合函数为 $y = y_0 + Ae^{(x-x_c)^2/2w^2}$, 其中, A 为曲线的峰计数, 顶点的坐标为 $(x_c, y_0 + A)$, w 为曲线宽度) 后的半高宽 (FWHM, $w_1 = 2\sqrt{\ln 2}w$) 分别为 0.428, 0.416 和 0.351 keV, 峰位均为 2.15 keV, 其中图 3(a) 峰计数较小, 背景辐射较大; 图 3(b) 相对峰计数较大, 背景辐射谱被抑制; 图 3(c) 峰计数增大到 1 433, Au- M_{α} 特征 X 射线明显。对于 X 射线谱的识别, 以美国国家标准技术局光谱数据库 (NIST Atomic Spectra Database) 的数据为依据。

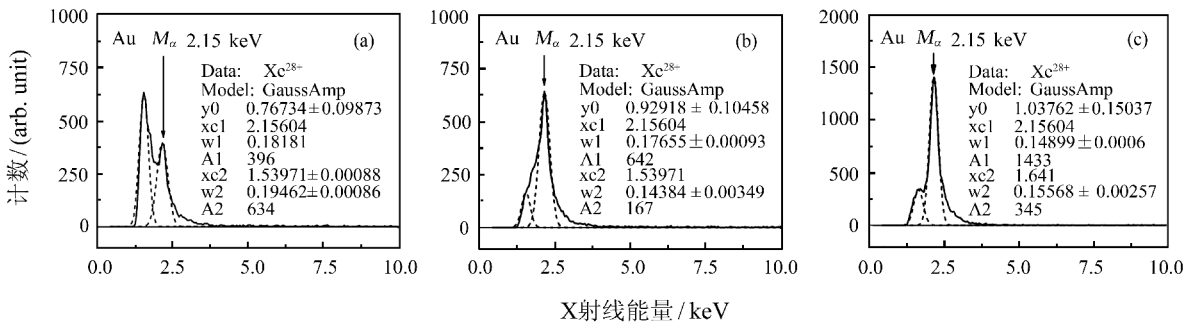


图 3 不同动能的¹²⁹Xe²⁸⁺ 轰击 Au 表面激发的 X 射线谱

$\Delta T = 5\ 400$ s, $I_{beam} = 106$ (a), 112 (b), 139 (c) nA; — 实验谱线, --- 拟合曲线。

3.2 动能不同的离子激发 Mo 的 X 射线谱

图 4(a), (b) 和 (c) 给出了动能分别为 400, 500 和 600 keV 的¹²⁹Xe²⁸⁺ 轰击 Mo 表面激发的 X 射线谱, 经 GaussAmp 拟合后的 FWHM 分别为 0.352,

0.401 和 0.406 keV, 峰位都为 2.32 keV, 其中图 4 (a) 峰计数较小, 背景辐射较大; 图 4 (b) 相对峰计数较大, 背景辐射谱被抑制; 图 4 (c) 峰计数增大到 341, Mo- $L_{\alpha 1}$ 特征 X 射线明显。

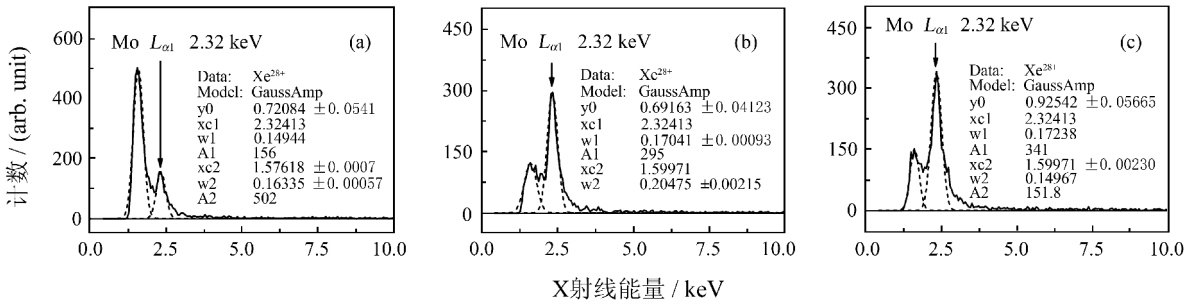


图 4 不同动能的 $^{129}\text{Xe}^{28+}$ 轰击 Mo 表面激发的 X 射线谱

$\Delta T = 5\ 400\ \text{s}$, $I_{\text{beam}} = 119$ (a), 126 (b), 105 (c) nA; — 实验谱线, --- 拟合曲线。

我们可以从入射离子与靶原子的电子间的相互作用过程来理解图 3 和图 4 的实验结果。携带大量势能的低速高电荷态离子在入射金属表面过程中, 当离子运动至临界距离 R_c [5]

$$R_c = \frac{1}{2W} \sqrt{8q + 2} \quad (1)$$

(W 为金属的脱出功, q 为入射离子的电荷态) 和离子与金属导带间形成的势垒低于金属的费米面时, 能量沉积于靶表面, 使靶原子 L 和 M 壳层的电子被激发或电离, 形成 L 和 M 壳层的空穴。另一方面, 在相互作用过程中, 发生共振电子转移和大量电子发射, 靶原子失去电子, 特别是失去内壳层 L 和 M 壳层上的电子形成空穴。当电子填充这些空穴时发射 L -和 M -X 射线。

图 3 中 Au 的 M_α -X 射线是相互作用过程中 Au 的 M 壳层产生空穴, N 壳层的电子填充 M 壳层的空穴时发射的。图 4 中 Mo 的 $L_{\alpha 1}$ -X 射线是 Mo 的 L 壳层产生空穴, M 壳层的电子填充 L 壳层的空穴时发射的。根据电子偶极跃迁的选择定则:

$$\Delta n \neq 0; \quad \Delta L = \pm 1; \quad \Delta J = 0, \pm 1$$

我们测量的 Au 的 M_α 特征 X 射线是 $4f_{7/2} \rightarrow 3d_{5/2}$, 即 $N_{\text{IV}} \rightarrow M_{\text{V}}$ 的跃迁。Mo 的 $L_{\alpha 1}$ 特征 X 射线是 $3d_{5/2} \rightarrow 2p_{5/2}$, 即 $M_{\text{V}} \rightarrow L_{\text{III}}$ 的跃迁。

从图 3 和图 4 可以看出, 在入射离子的电荷态和能量相同的条件下, 在相互作用过程中, 对于核电荷数较小、原子质量较轻的靶原子只有其内壳层的电子被激发而产生 X 射线, 而核电荷数较大、原子质量较重的靶原子只有其较外壳层的电子被激发而产生 X 射线, 如 Mo ($Z=42$) 为 L 壳层, Au ($Z=79$) 为 M 壳层。这是因为对于核电荷数较大、原子质量较重的原子, 激发其深层的电子需要更高的能

量。

3.3 $^{129}\text{Xe}^{28+}$ 轰击 Au 和 Mo 表面产生的 X 射线产额

图 5 给出了 Mo 和 Au 靶原子的 X 射线的产额与入射离子动能的典型变化关系。

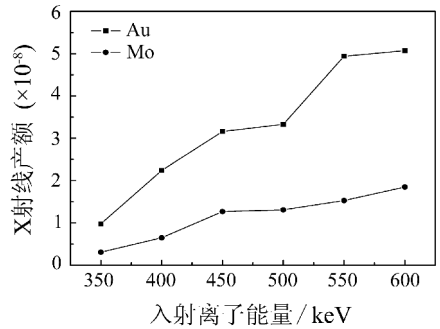


图 5 $^{129}\text{Xe}^{28+}$ 轰击 Au 和 Mo 表面产生的 X 射线产额与入射离子动能的关系

根据本次实验和测量条件, 并假定 X 射线发射是各向同性的, 可以给出 Xe^{q+} 作用于金属表面的单个离子 X 射线产额 [6]:

$$Y = \frac{C}{N} = 2.7 \times 10^{-6} \times \frac{q \times \omega_1 \times A}{I_{\text{beam}} \times \Delta T} \quad (2)$$

其中, C 为总计数, N 为总粒子数, q 为入射离子的电荷态, ω_1 为半高宽 (FWHM) (单位: keV), A 为峰计数, I_{beam} 为靶电流强度表示的束流强度 (单位是 nA)。利用 (2) 式, 可以计算出单离子 X 射线产额 (350 keV 的 Xe^{28+} 轰击 Au, X 射线产额约为 0.98×10^{-8} , 600 keV 的 Xe^{28+} 轰击 Au, X 射线产额约为 5.07×10^{-8} ; 350 keV 的 Xe^{28+} 轰击 Mo, X 射线产额约为 0.31×10^{-8} , 600 keV 的 Xe^{28+} 轰击 Mo, X 射线产额约为 1.85×10^{-8})。从图 5 可以看出, 靶原子的 X 射线产额随着入射离子动能的增加而增加。这是因为在相互作用过程中, 随着入射离

子动能的增加, 离子激发靶原子内壳层电子的概率增加, 所以 X 射线的产额增加。对于同一动能的 Xe 离子, 核电荷数较小、原子质量较轻的靶原子产生 X 射线的产额较低, 而核电荷数较大、原子质量较重的靶原子产生 X 射线的产额较高。

4 结论

高电荷态离子与金属表面相互作用过程中, 入射离子的势能、动能和这种相互作用特有的镜像相互作用势能沉积在靶表面, 使靶原子内壳层电子激发和电离, 形成空穴, 外壳层电子填充空穴辐射特征 X 射线。在入射离子的电荷态和能量相同的条件下, 对于核电荷数较小、原子质量较轻的靶原子, 能够激发其内壳层的电子而产生 X 射线, 而对核电荷数较大、原子质量较重的靶原子, 只能激发其较外壳层的电子而产生 X 射线。特征 X 射线的产额随入射离子动能的增加而增加。对于同一动能的 Xe 离子, 核电荷数较小、原子质量较轻的靶原子产生的 X 射线产额较低, 而核电荷数较大、原子质量较重的靶原子产生的 X 射线产额较高。

参考文献 (References):

- [1] Yang Zhihu, Song Zhangyong, Chen Ximeng, *et al.* Acta Physica Sinica, 2006, **55**(5): 2 221(in Chinese).
(杨治虎, 宋张勇, 陈熙萌等. 物理学报, 2006, **55**(5): 2 221.)
- [2] Zhang Xiaolan, Xiao Guoqing, Yang Zhihu, *et al.* Science in China Series, 2006, **G36**(2): 132(in Chinese).
(张小安, 肖国青, 杨治虎等. 中国科学, 2006, **G36**(2): 132.)
- [3] Zhang Xiaolan, Zhao Yongtao, Li Fuli, *et al.* Acta Optica Sinica, 2004, **24**(5): 713(in Chinese).
(张小安, 赵永涛, 李福利等. 光学学报, 2004, **24**(5): 713.)
- [4] Yang Zhihu, Chen Ximeng, Du Shubin, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 2006, **40**(2): 189(in Chinese).
(杨治虎, 陈熙萌, 杜树斌等. 原子能科学技术, 2006, **40**(2): 189.)
- [5] Burgdorfer J, Lerner P, Meyer F W. Phys Rev, 1991, **A44**(6): 5 674.
- [6] Zhang Xiaolan, Zhao Yongtao, Li Fuli, *et al.* Science in China Series, 2004, **G34**(4): 414(in Chinese).
(张小安, 赵永涛, 李福利等. 中国科学, 2004, **G34**(4): 414.)

X-ray Spectrum in Highly Charged $^{129}\text{Xe}^{28+}$ Interacting with Au and Mo Surface^{*}

LIANG Chang-hui^{1, 2, 1)}, ZHANG Xiao-an^{2, 3}, XIAO Guo-qing³

(1 School of Electronic and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2 Department of Physics, Xianyang Normal College, Xianyang 712000, Shanxi, China;

3 Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: It was studied that the characteristic X ray spectra produced by the interaction of highly charged ions of $^{129}\text{Xe}^{28+}$ with metallic surface of Au and Mo. The experimental result shows that the target atom with less core charged amounts and less atom mass can stimulate inner layer electron to produce X ray when the incident ion has the same charge and the same energy. On the other hand the target atom with more core charge amounts and atom mass can only stimulate outer layer electron to produce X ray. The yield of the characteristic X ray increases with the increase of the iron's kinetic energy.

Key words: highly charged ion; X ray; yield

* Received date: 07 Dec. 2006; Revised date: 22 May 2007

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10574132, 10405025); Special Fund of Education Department of Shanxi Province(04JK300); Scientific Research Foundation of Xianyang Normal College(05XSYK103)

1) E-mail: liangchanghui73@163.com