

文章编号: 1007-4627(2009)02-0146-04

低速 Ar^{q+} ($q=7-14$) 离子入射 Au 表面激发的 X 射线谱^{*}

任惠娟¹, 张小安^{1, 2, #}, 肖国青²

(1 咸阳师范学院物理学系, 陕西 咸阳 712000;

2 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 $^{40}\text{Ar}^{q+}$ ($q=7-14$) 轰击金属 Au 表面产生的特征 X 射线谱。实验结果表明, 在弱束流(nA 量级)的情况下, 对于动能相同的入射离子, 当电荷态比较高($q=11$)时, 便能有效地激发靶原子的特征 X 射线, 单离子的 X 射线产额高达 10^{-8} 量级。分析结果显示, 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, 形成空穴和产生外壳层电子填充空穴辐射特征 X 射线, 特征 X 射线的产额随入射离子的势能(电荷态)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

电子回旋共振离子源(Electron Cyclotron Resonance Ion Source, 简称 ECRIS)可提供高电荷态的离子束流, 离子核外的大部分电子轨道处于空置状态, 在其逼近金属表面过程中, 当运动至临界距离时, 入射离子与金属表面间的势垒高度低于费米面, 金属导带的电子会大量共振转移到入射离子, 使离子中性化, 释放势能于表面, 受入射离子产生的强库仑电场和势能表层沉积的作用, 靶表层原子会被大量激发、电离和溅射, 发射电子和 X 射线^[1-4]。另一方面, 高电荷态离子与固体表面相互作用过程中在飞秒时间内, 将携带的几十到几百 keV 能量沉积在固体表面纳米尺度空间, 使入射离子和靶原子激发和离化。目前, 国际著名实验室如美国 Lawrence Livermore 和 Lawrence Berkeley 国家实验室利用 Xe^{q+} , Ho^{q+} 和 Th^{q+} 离子分别入射金属表面, 发现了离子俘获电子后存在着内部双电子激发过程^[5], Gearba 等对离子与靶作用产生的类氢和类氦 Rydberg 离子的 Stark 感生 X 线辐射进行研究, 这使得高电荷态离子与固体表面相互作用过程

中 X 射线产生机理的研究进一步深入^[6, 7]。高电荷态离子与固体表面相互作用发射的 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。

本文报道了我们在兰州重离子加速器国家实验室 ECR 离子源原子物理实验平台上, 利用高电荷态 $^{40}\text{Ar}^{q+}$ ($q=7-14$) 离子轰击 Au 固体表面, 对所产生的 X 射线进行研究。结果表明, 低速高电荷态离子入射金属表面过程中, 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, 形成空穴和产生外壳层电子填充空穴辐射特征 X 射线, 特征 X 射线的产额随入射离子的势能(电荷态)的增加而增加。

2 实验装置和测量方法

本实验平台在文献[8]中已经作了详细的描述。 $^{40}\text{Ar}^{q+}$ 离子由兰州重离子加速器 ECR 离子源提供, 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,

* 收稿日期: 2008-12-02; 修改日期: 2009-2-18

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10574132); 陕西省自然科学基金资助项目(2007A05); 咸阳师范学院引进人才计划项目(05XSYK103); 咸阳师范学院科研基金资助项目(07XSYK264)

作者简介: 任惠娟(1972-), 女(汉族), 陕西周至人, 讲师, 博士研究生, 从事原子物理与声学研究。

通讯联系人: 张小安, E-mail: zhangxiaoan2000@yahoo.com.cn

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。

实验中, 作用束流的束斑直径可控制在5 mm内, 束流强度为enA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表面, 其表面积为 $19\text{ mm} \times 24\text{ mm}$, 厚度为0.1 mm。

利用Si(Li) 探测器观测入射离子与固体表面相互作用所产生的X射线谱。实验前利用 ^{241}Am 和 ^{55}Fe 放射源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, Be窗的透射率约为83%。探测器的直径为10 mm, 距离靶点80 mm, 实验测量时间

选为5400 s。

3 实验结果与讨论

对于X射线谱的识别, 我们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, 实验误差小于3%。

图1给出了动能为150 keV的 $^{40}\text{Ar}^{7+}$ — $^{40}\text{Ar}^{10+}$ 离子分别入射Au表面时探测到的X射线谱。离子具有的势能分别为 $^{40}\text{Ar}^{7+}$, 426 eV; $^{40}\text{Ar}^{8+}$, 567 eV; $^{40}\text{Ar}^{9+}$, 988 eV; $^{40}\text{Ar}^{10+}$, 1.47 keV。对速度小于Bohr速度(2.19×10^6 m/s)和动能小于25 keV/u的低速高电荷态离子入射固体表面过程中, 当入射离子的核电荷数 Z 和靶原子的核电荷数相比较小时, 离子的动能与相互作用过程中靶原子的离化和激发没有强的相关性^[7]。由于 $^{40}\text{Ar}^{7+}$ — $^{40}\text{Ar}^{10+}$ 离子的势能较小(最大1.47 keV), 不能使Au原子的M壳层产

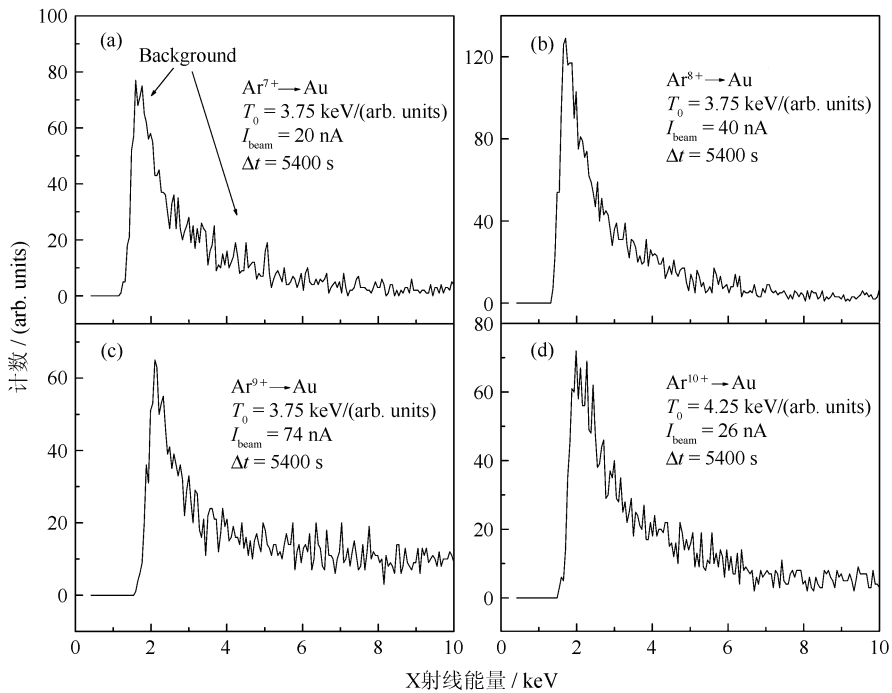


图1 $^{40}\text{Ar}^{7+}$ — $^{40}\text{Ar}^{10+}$ 离子在Au产生的背景辐射

生空穴, Au的M壳层的一个3d电子的最小电离能为1.97 keV, 因此, 探测不到Au的 M_α 特征X射线。

图2给出了动能为150 keV的 $^{40}\text{Ar}^{11+}$ — $^{40}\text{Ar}^{14+}$ 离子分别入射Au表面产生的Au的 M_α 特征X射线谱, X射线谱的半高宽(FWHM)用 Γ 表示(单位keV), $\Gamma = 2\sqrt{\ln 4} w$, w 是GaussAmp拟合的半高宽,

$2\sqrt{\ln 4}$ 是GaussAmp拟合的转换系数。

根据本次实验条件和测量条件, 并假定X射线发射是各向同性的, 可以给出 $^{40}\text{Ar}^{q+}$ 作用于Au表面的单离子X射线产额:

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

其中, C 为总计数, N 为总粒子数, q 为入射离子的电荷态, A 为峰计数, I_{beam} 为用靶电流强度表示的束流强度(单位nA)。利用公式(2)计算出的各种电荷态单离子的X射线产额分别为 $^{40}\text{Ar}^{11+}$, 1.89×10^{-8} ; $^{40}\text{Ar}^{12+}$, 2.43×10^{-8} ; $^{40}\text{Ar}^{13+}$, 3.65×10^{-8} ; $^{40}\text{Ar}^{14+}$, 7.88×10^{-8} 。

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 ^[9]

$$R_c = \frac{1}{2W} \sqrt{8q+2} \quad (3)$$

(W 为金属的脱出功, q 为入射离子的电荷态)离子与金属导带间形成的势垒低于金属的费米面时, 金属导带电子共振转移到入射离子中与导带匹配的能

级, 离子在表面上俘获多个电子完全中性化后, 释放其具有的势能(Ar^{11+} , 2.004 keV; Ar^{12+} , 2.628 keV; Ar^{13+} , 3.309 keV; Ar^{14+} , 4.065 keV)在金属靶表面, 使靶原子激发和电离。高电荷态离子所具有的势能越大, 通过势能沉积而使M壳层电子电离的靶原子数目越多, Au的 $M\alpha$ -X射线产额越大。另外, 高电荷态离子入射到金属表面, 金属表面对离子产生镜像加速, 引起离子能量增益 ΔE ^[10]:

$$\Delta E = \frac{Wq^{3/2}}{4\sqrt{2}}, \quad (4)$$

虽然增益的能量(eV量级)也沉积在靶表面, 可加强靶原子的激发和电离, 但是增益的能量与离子的势能和动能相比很小, 其产生的效果可略去。

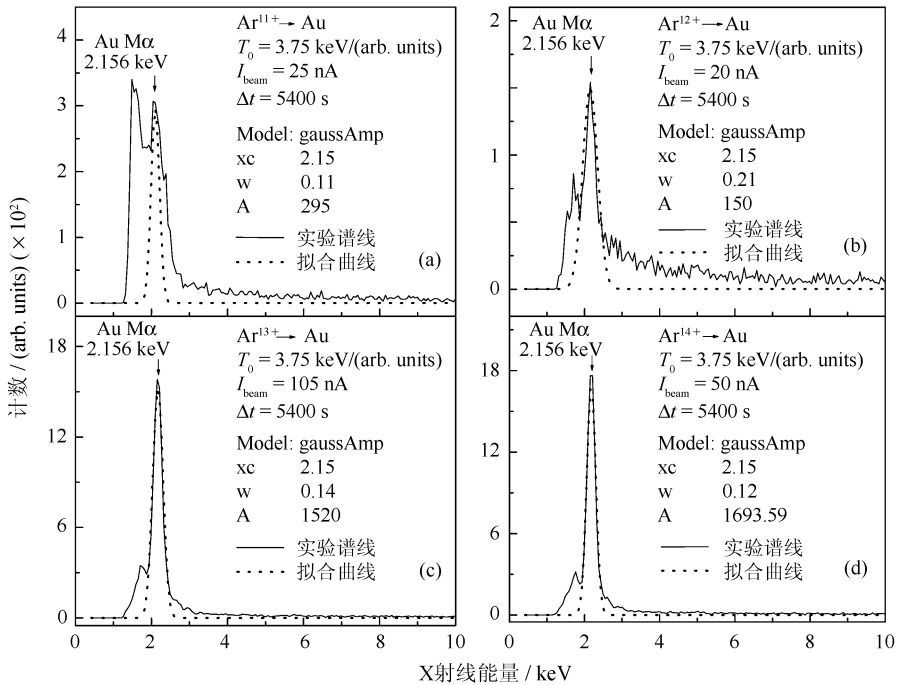


图2 $^{40}\text{Ar}^{11+} - ^{40}\text{Ar}^{14+}$ 离子入射Au表面产生的X射线谱

由产额计算结果可以看出, 对于同一动能的高电荷态的Ar离子, 入射离子的电荷态越高(势能越大), 相互作用过程中靶原子的特征X射线产额越大。这与上述分析结果一致。

根据电子偶极跃迁的选择定则:

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

我们测量的Au的 $M\alpha$ 特征X射线, 是 $4f_{7/2} \rightarrow 3d_{5/2}$ 即 $N_{\text{VII}} \rightarrow M_{\text{V}}$ 的跃迁。即高电荷态离子的释放势能能使靶表面原子Au的M壳层的一个3d电子电

离(其电子组态为 $3d_{5/2}$), 形成孔穴, N壳层的一个4f电子(其电子组态为 $4f_{7/2}$)填充该空穴辐射 $M\alpha$ -X射线。

对于本工作的实验结果, 我们仅给出定性的解释, 要给出定量的解释目前有一定的困难。因为, 在理论上, 这是一个复杂的多体问题, 存在着很强的库仑场(如 U^{91+} 产生的场强约为 10^{16} V/cm), 量子力学的微扰理论已不适用。由于入射离子与金属导带之间耦合, 靶原子激发态的共振散射波函数不是平方可积的, 所以传统的束缚态方法就不能使

用, 密度泛函理论不适合描述这种多激发态, 局域密度近似不适合描述离子与固体表面相互作用的范围在 20 \AA 的动态过程。因此, 关于定量阐述高电荷态离子与固体表面相互作用过程中能量转移使靶原子激发的机理, 需要进一步深入研究。

4 结论

低速高电荷态离子入射金属表面过程中, 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, 特征 X 射线的产额随入射离子的势能(电荷态)的增加而增加。

参考文献 (References):

[1] Zhang Xiao'an, Xiao Guoqing, Wang Wusheng, *et al.* Nuclear Physics Review, 2002, 19(3): 342(in Chinese).
(张小安, 肖国青, 王武生等. 原子核物理评论, 2002, 19(3): 342.)

[2] Yang Zhihu, Xiao Guoqing, Chen Ximeng, *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics, 2004, 28: 1231(in Chinese).
(杨治虎, 肖国青, 陈熙萌等. 高能物理与核物理, 2004, 28: 1231.)

[3] Liang Changhui, Zhang Xiao'an, Xiao Guoqing. Nuclear Physics Review, 2007, 24(3): 214(in Chinese).
(梁昌慧, 张小安, 肖国青. 原子核物理评论, 2007, 24(3): 214.)

[4] Zhang Xiao'an, Xiao Guoqing, Yang Zhihu, *et al.* Science in China (Series G), 2006, 49(2): 203.

[5] Machicoane G A, Schenkel T, Niedermayr T R, *et al.* Phys Rev, 2002, A65: 042903.

[6] Geraba M A, Komara R A, Lundeen S R. Phys Rev, 2005, A71: 013424.

[7] Schenkel T, Hamza A V, Barnes A V, *et al.* Progress in Surface Science, 1999, 61: 23.

[8] Yang Zhihu, Song Zhangyong, Chen Ximeng, *et al.* Acta Physica Sinica, 2006, 55(5): 2221(in Chinese).
(杨治虎, 宋张勇, 陈熙萌等. 物理学报, 2006, 55(5): 2221.)

[9] Burgdörfer J, Lerner P, Meyer F W. Phys Rev, 1991, A44: 5674.

[10] Ducrée J J, Casali F, Thumm U. Phys Rev, 1998, A57: 338.

X-ray Spectra Excited in Ar^{q+} ($q=7-14$) Incidence on Au Surface^{*}

REN Hui-juan^{1,2}, ZHANG Xiao-an^{1,2,*}, XIAO Guo-qing³

(1 Department of Physics, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, Shaanxi, China;

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

Abstract: The Au atomic M_{α} characteristic X-ray spectrum has been measured for the slow highly charged ions Ar^{q+} ($q=7-14$) impacting on Au surface. The result shows that as long as the charge state of projectile is higher($q=11$), the characteristic X-rays of heavy atomic can be effectively excited even though the ionic beam is very weak(nA magnitude), and the single ionic X-ray yield is in the order of 10^{-8} and increases with potential energies of projectiles.

Key words: highly charged ion; characteristic X-ray; yield

* Received date: 2 Dec. 2008; Revised date: 18 Feb. 2009

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10574132); Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2007A05); Talent Recruitment Introduce Project of Xianyang Normal University(05XSYK103); Science Research Fund of Xianyang Normal University(07XSYK264)

Corresponding author: Zhang Xiao-an, E-mail: zhangxiaonan2000@yahoo.com.cn