

高电荷态离子 Ar^{13+} 轰击 Mo 金属表面 形成靶原子 X 射线谱测量

杨治虎¹, 陈熙萌², 杜树斌³, 张小安⁴, 赵永涛¹, 张艳萍³, 崔莹²,
张红强², 徐徐², 邵剑雄², 王立⁴, 肖国青¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000; 2. 兰州大学现代物理系, 甘肃兰州 730000;
3. 中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413; 4. 咸阳师范学院物理系, 陕西咸阳 712000)

摘要: 本工作实验研究低能高电荷态 Ar^{13+} 离子与金属 Mo 表面作用过程中 Mo 原子受激发射 X 射线和 X 射线强度随入射能量的变化。实验结果表明, 低速高电荷离子与金属表面原子相互作用可有效地激发靶原子或靶离子内壳层电子而发射 X 射线。

关键词: 高电荷态离子; 钼金属表面; X 射线

中图分类号: O561.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-6931(2006)02-0189-03

X-ray Spectra of Target Atoms Emitted in Impact of Ar^{13+} Upon Mo Metallic Surface

YANG Zhi-hu¹, CHEN Xi-meng², DU Shu-bin³, ZHANG Xiao-an⁴,
ZHAO Yong-tao¹, ZHANG Yan-ping³, CUI Ying², ZHANG Hong-qi²,
XU Xu², SHAO Jian-xiong², WANG Li⁴, XIAO Guo-qing¹

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*
2. *Department of Modern Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;*
3. *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;*
4. *Department of Physics, Xianyang Normal College, Xianyang 712000, China*)

Abstract: X-ray spectra and intensities variation with incident energy of low energy highly charged Ar^{13+} ions in interaction with Mo metallic surface was studied. The results show that inner shell electrons of target atoms are excited, and X-rays emitted.

Key words: highly charged ion; Mo metallic surface; X-ray

在低速 ($v < v_0 = 2.19 \times 10^6$ m/s) 高电荷态
离子与固体金属表面相互作用过程中, 大量的导

带电子转移到入射离子的外壳层空位上产生“空
心原子”, 并在 fs 时间尺度和 nm 空间范围在固

收稿日期: 2004-06-10; 修回日期: 2004-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(274088, 10134010); 科技部重大基础研究前期研究专项基金和高温高密度等离子体物
理国防科技重点实验室基金资助项目(2002CCA00900, 51480020104ZK5101)

作者简介: 杨治虎(1954—), 男, 甘肃平凉人, 副研究员, 实验核物理专业

体表面沉积几十到几百 keV 能量,功率密度可达 10^{14} W/cm²,致使固体表面形成 nm 级坑蚀。另外,与单电荷态离子相比,低速高电荷态离子引起二次电子发射产额增加了 1 个数量级,二次离子的溅射产额增加了近 3 个数量级,将溅射出大量电子、离子、原子,并发射 X 射线。低速高电荷态离子与固体金属表面相互作用过程的研究在固体表面修正和半导体材料等方面有着广泛的应用前景,并受到国际学者的广泛关注^[1-3]。

高电荷态离子入射金属表面发射电子的能量占高电荷态离子所带势能的 1%,发射 X 射线的能量占高电荷态离子所带势能的 5%,电子发射、X 射线发射和二次离子溅射总能量仅占高电荷态离子释放到金属表面势能的 10%,其余大部分势能通过俘获金属表面电子释放于金属表面,使靶原子受激,形成辐射。通过对入射离子与靶原子受激辐射的特征谱之间关系的分析,可了解高电荷离子与靶原子相互作用过程。

本工作利用兰州重离子加速器国家实验室电子回旋共振离子源(ECRIS)提供的不同低能 Ar¹³⁺ 离子轰击 Mo 金属表面进行靶原子受激发射 X 射线谱的实验研究。

1 实验测量

实验装置与文献 [4] 中的相同。高电荷态离子由 14 GHz 电子回旋共振离子源(ECRIS)提供,离子经聚束器、聚焦和准直,由 90° 偏转分析磁铁将分析离子经四极透镜和光阑引入靶室与金属表面作用。实验中,束流强度根据实验要求确定。靶室真空度保持为 5×10^{-7} Pa。对 ⁴⁰Ar^{q+} 离子, q 可调范围为 $6 < q < 18$ 。实验过程中,束流束斑控制在 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 范围内,流强为 30 nA,并保持稳定,离子以 45° 方向入射到经表面净化处理的纯度为 99.99% 的金属 Mo 表面(表面积 $19 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$,厚度 1 mm)。Ar¹³⁺ 与 Mo 表面作用产生 X 射线,用与固体表面垂直方向的 Si(Li) X 射线探测器探测,探测器的几何立体角为 1.2×10^{-2} sr。Si(Li)探测器与靶室间用 $50 \mu\text{m}$ Be 窗分离,以保持靶室内的超高真空。处在大气中的 Si(Li)探测器尽可能接近 Be 窗,使靶室与探测器间的空气层减少到最小,以减少 X 射线在空气中的损失。实验期间,用 ⁵⁵Fe 和 ²⁴¹Am 放射源对探测器进行刻度。对 ⁵⁵Fe 的

5.89 keV X 射线,探测器的分辨率为 190 eV。在实验中,通过分析磁铁选择和探测系统的分析确保 Ar¹³⁺ 离子与 Mo 表面相互作用产生 X 射线。

2 实验结果和分析讨论

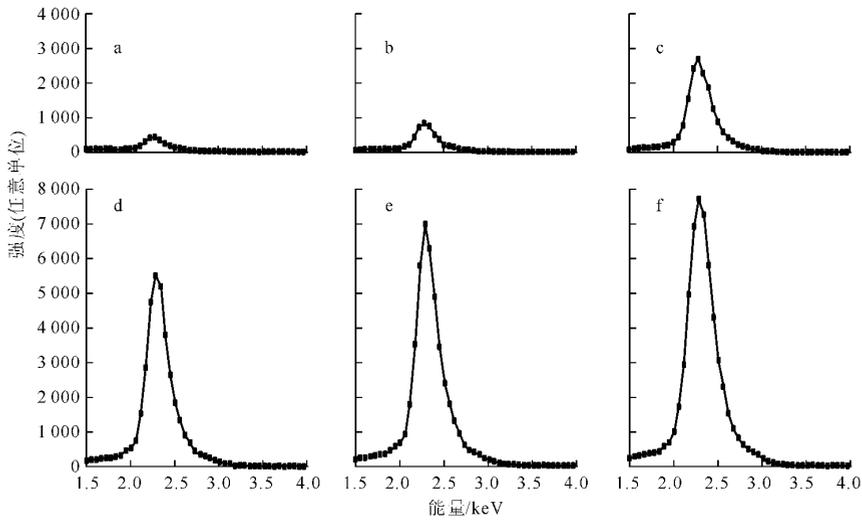
图 1 示出不同能量 Ar¹³⁺ 离子入射 Mo 表面靶原子受激辐射的 L_{α1} X 特征射线谱。

本实验选择 Ar¹³⁺ 的能量分别为 195、221、247、273、299 和 325 keV 的束流入射到 Mo 固体金属表面,测量其受激辐射 2.3 keV 的特征 X 射线。实验中每一能量点的测量时间均为 540 s。图 1 显示,实验测量的 X 射线强度随入射能量增加而明显增强,特征 X 射线谱宽度则近乎不变。

低速高电荷态离子与金属表面作用过程中,根据经典过垒模型(classic over-barrier),当离子运动至距表面为 R_c ^[5] ($R_c = \frac{e}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\sqrt{8q+2}}{2W}$, q 为离子的电荷态, ϵ_0 为电介质常数, W 为金属的功函数)时,开始俘获金属表面电子,形成处于高激发态的空心原子。高激发态的空心原子逼近金属固体表面时退激而释放势能于表面,使表面的靶原子受激,发射特征光谱线, X 射线一直延伸到红外。入射离子电荷态越高,空心原子中处于激发态的电子数目越多,由 Penning 碰撞导致的光辐射越强。在本工作中, Penning 碰撞导致的光辐射过程可表示为 $\text{Ar}^* + \text{B} \rightarrow \text{Ar} + \text{B}^* \rightarrow \text{B} + h\nu$ 。其中: Ar* 为高激发态的 Ar 空心原子,上标“*”表示激发态; B 表示靶原子, B* 表示靶原子的激发态。

高电荷态离子在俘获靶电子形成空心原子的同时,释放自身所携带的势能 E_p ($E_p = \frac{e}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{R_c} - W$)。势能沉积在金属表面,使靶原子激发。高电荷离子在单电子俘获的同时存在多电子俘获。在多电子俘获过程中,电子转移越多,激发靶原子的特征辐射光谱越复杂,且强度越强。高电荷离子入射到金属表面,金属表面对离子产生像电荷,像电荷使得低速高电荷离子加速,引起离子能量增益^[6],有 $\Delta E = Wq^{3/2}/4\sqrt{2}$ 。增益能量也沉积在靶表面,加强了靶原子的激发。

低速高电荷离子与表面作用过程非常复杂。低速高电荷离子与金属固体表面作用过程

图1 不同能量 Ar¹³⁺ 离子入射在 Mo 表面产生的特征 X 射线谱Fig. 1 X-ray spectra for various energy of Ar¹³⁺ ions injected on Mo target surface
Ar¹³⁺ 离子能量, keV: a—195; b—221; c—247; d—273; e—299; f—325

中的靶原子激发与入射离子电荷态有强的相关性。靶原子受激辐射强度与相互作用过程中电子转移密切相关。图 1 显示, X 射线谱强度随入射离子能量增加而增强。这一方面是因 Ar¹³⁺ 的电子组态与 Mo 的内壳层激发电子组态相匹配, 在 Ar¹³⁺ 离子逼近 Mo 表面过程中, 大量共振电子转移, 使更多的 Mo 原子内壳层共振激发, 靶原子通过共振转移从入射离子获得的势能随入射离子能量增加而增大, 靶原子的激发特征 X 射线辐射的强度变强; 另一方面, 在作用过程中, 离子电荷态 q 超过临界电荷 q_c 值 ($q_c = \frac{(E_s + W)^2}{W^2} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{W^2}{2(E_s + W)^2}} \right]$, $E_s = \frac{2qW}{\sqrt{8q+2}} - W$, 为单电子俘获释放的势能) 后开始了多电子俘获过程, 不再是逐次单电子俘获。

以上分析是初步的。辐射 X 射线谱随入射离子能量增强不仅与电子被俘获后释放出的势能激发靶表面等离子元^[7]有关, 还与入射离子动能有关。动能也起了直接激发作用。在本测量结果中, 高电荷离子入射金属表面, 俘获金属导带电子, 形成空心原子, 而空心原子则可经历 Auger 和 X 射线辐射过程。因受探测器探测能量范围所限, 未观测到空心原子的 Auger 和 X 射线辐射过程。

对低速高电荷离子激发金属表面发射 X 射线的研究是初步的, 还须进一步进行实验和

探索, 研究发射和激发机制。

参考文献:

- [1] TRÖBERT B, BEIERSDORFER P, BROWN G V, et al. Experimental M1 transition rates in K χ , K χ V and K χ VI [J]. Phys Rev, 2001, A64:34 501-34 504.
- [2] HATTASS M, SCHENKEL T, BARNES A V, et al. Charge equilibration time of slow, highly charged ions in solids[J]. Phys Rev Lett, 1999, 82:4 795-4 798.
- [3] SCHENKEL T, BARNES A V, HAMZA, A V, et al. Synergy of electronic excitation collision spikes in sputtering of heavy metal oxides[J]. Phys Rev Lett, 1998, 80:4 325-4 328.
- [4] 张小安, 赵永涛, 李富利, 等. ⁴⁰Ar¹⁰⁺ 轰击 Al 和 Si 固体表面形成的 200 nm-1 000 nm 光谱[J]. 中国科学(G 辑), 2003, 33(3):243-239.
- [5] BURGDÖRFER J, LERNER P, MEYER F W. Above-surface neutralization of highly charged ions[J]. Phys Rev, 1991, A44:5 674-5 685.
- [6] DUCRÉE J J, CASALI F, THUMN U. Extended classical over-barrier model for collisions of highly charged ions with conducting and insulating[J]. Phys Rev, 1998, A57:338-350.
- [7] NIEMANN D, GREYER M. Plasmon excitation by multiply charged Ne^{q+} ions interacting with an Al surface[J]. Phys Rev Lett, 1998, 80: 3 328-3 331.