

高电荷态离子 Ar^{17+} 与 Mo 表面作用过程中的 X 射线发射^{*}

杨治虎^{1;1)} 肖国青¹ 陈熙萌² 张艳萍¹ 赵永涛¹ 张小安³
苏弘¹ 崔莹² 张红强² 徐徐² 邵剑雄²

1(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2(兰州大学现代物理系 兰州 730000)

3(西安交通大学应用物理系 西安 710049)

摘要 观测了低速(小于 Bohr 速度)高电荷 Ar^{17+} 离子与金属 Mo 表面相互作用的 X 射线发射,以及 Ar $K\alpha, K\beta$ X 射线强度随入射离子动能的变化.

关键词 高电荷态离子 X 射线发射 Mo 金属表面

1 引言

低速、高电荷态离子与固体表面作用的研究是近几年在国际上广受关注的热点研究领域^[1-4]. 低速高电荷离子与固体表面作用过程中,在 fs 时间内将几十到几百 keV 的势能沉积在靶表面 nm 尺度范围,能流功率密度可达 $10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$,在这样的时间和空间范围内,势能如何沉积于固体表面以及表面对沉积的势能的影响,是目前高电荷态离子与固体表面作用研究中最为关心的问题,电子和 X 射线发射是获得这些信息的主要研究途径.

电子和 X 射线发射是高电荷态离子与表面作用过程中的主要物理特征之一,电子和 X 射线发射的一个重要图像是空心原子(hollow atom)的产生. 高电荷态离子与表面作用过程中,当距表面的距离达到临界距离 $d_c = \sqrt{2q/W}$ 时,离子与表面间的势垒高度低于金属脱出功,表面电子开始共振转移,进入离子 $n \approx q/\sqrt{2W}$ 的高 n 能级,形成高激发态的空心原子. 空心原子是复杂的多激发态原子,大部分内壳层有空穴,电子布居在准稳高 Rydberg 态. 一般地讲,对于高激发态的较轻空心原子, Auger 电子谱就

能呈现其能级结构的信息. 对较重的高激发态空心原子,需要用 X 射线谱来研究其物理过程^[5]. 利用高分辨的 X 射线谱仪还可以观测到伴线. 本文报道的高电荷态离子 Ar^{17+} 与 Mo 表面作用过程中的 X 射线实验结果,是利用最近从 ECR 离子源上首次引出的 Ar^{17+} 离子进行的实验获得的. 实验结果不仅对于研究高电荷态离子与固体表面作用过程中的能量转移机理、离子中性化过程,以及研究离子的多重激发态结构有重要意义,并且具有广泛的应用前景^[6].

2 实验装置与方法

实验在兰州重离子加速器国家实验室完成,实验研究装置可从参考文献^[7]得到. 高电荷态离子由 14.5GHz 电子回旋共振离子源(ECRIS)提供^[8],离子经过聚束器、聚焦和准直,利用 90° 偏转分析磁铁、四极透镜和二维准直光栏将离子引入靶室,与金属表面作用. 束流强度根据实验所要求确定,靶室的真空度保持在 $2 \times 10^{-8} \text{mb}$. 对于 $^{40}\text{Ar}^q$ 离子的电荷态 q 可调范围为 $6 < q < 18$. 在实验过程中,束流的束斑可

2004-03-25 收稿

* 国家自然科学基金(274088, 10134010), 部科技重大基础研究前期研究专项(2002CCA00900)资助

1) E-mail: z.yang@impcas.ac.cn

控制在 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 范围,束流强度稳定在 0.24nA ,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(表面积为 $19\text{mm} \times 24\text{mm}$,厚度为 1mm). Ar^{17+} 与 Mo 表面作用过程中产生 X 射线,用于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 $1.2 \times 10^{-2}\text{sr}$. Si(Li) 探测器与靶室之间用 $50\mu\text{m}$ 的 Be 窗分隔,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,使靶室与探测器之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 ^{55}Fe 和 ^{241}Am 放射源对探测器进行了刻度,对 ^{55}Fe 的 5.89keV 的 X 射线,探测器的分辨为 190eV .

3 实验结果与讨论

本实验目的在于实验研究低速高电荷态 Ar^{17+} 离子与钼表面作用过程中的 X 射线发射. 实际上,在实验中低速高电荷态离子与金属 Mo 表面作用不仅存在 X 射线发射,而且还存在可见光和电子发射. 离子与表面作用中引起 X 射线发射是表征“空心原子”的主要特征. 根据经典过垒模型^[9],带有较大势能的高电荷态离子逼近金属表面时,表面电子受到感应而产生集体响应,形成像电荷,像电荷加速离子向表面的运动,引起离子的动能增益,同时还改变离子与表面之间的势垒以及入射离子的能级结构. 当离子运动至临界距离

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

时(q 为入射离子的电荷态, W 为靶材料的脱出功),离子与表面之间的势垒因为镜像相互作用而低于 Fermi 能级,导带电子开始向入射离子共振转移,进入到与导带能级匹配的离子能级(一般为高激发态),离子匹配能级的主量子数为

$$n_c \approx \frac{q}{\sqrt{2W}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{q-0.5}{\sqrt{8q}}}}, \quad (2)$$

离子共振俘获电子后形成高激发态的空心原子. 空心原子通过各种方式退激发,其中发射 X 射线特征光谱是退激的主要途径之一.

根据这个模型, Ar^{17+} 离子逼近表面时在很短的时间从 Mo 靶表面俘获大量的电子,形成空心原子($n \sim 20-30$),并且 Ar^{17+} 离子中性化,处在多激发态的 Ar 原子可通过 Auger 电子和 X 射线发射而衰变. 在这个过程中,起初阶段的 Auger 电子发射退

激的几率大于 X 射线发射,并且弱地依赖 n , 最后阶段 X 射线发射的退激几率可与 Auger 电子发射退激的几率比较. 在本实验研究中,我们观测了入射能量分别为 $204, 238, 272, 323, 257, 391\text{keV}$ 的 Ar^{17+} 离子与 Mo 表面作用发射的 X 射线谱. 图 1 是用 Si(Li) 探测器观测的入射能量为 204keV 的 Ar^{17+} $\text{K}\alpha$ 的典型光谱. 从不同入射能量测量分析, Ar^{17+} 离子与 Mo 表面作用过程中形成的空心 Ar 原子有一个 K 壳空穴,最可能的情况是 $2p$ 电子跃迁到 $1s$ 能级发射的射线. 实验观测到 Ar 的 $\text{K}\alpha$ X 射线是 L 壳层的电子填充 K 壳层空穴($2p \rightarrow 1s$)发射的.

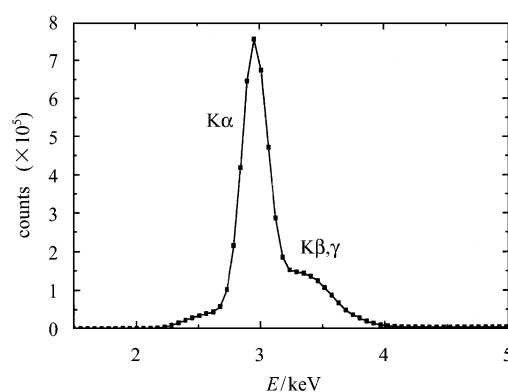


图 1 Ar^{17+} 离子入射在金属 Mo 表面的 X 射线光谱

Ar^{17+} 离子与金属表面相互作用发射 X 射线的研究的首次实验是 Donets^[10] 在 EBIS 上进行的, X 射线的光谱利用半导体(Ge) X 射线谱仪测量,实验是研究 Ar^{17+} 离子与钼表面作用的 X 射线发射. 我们的实验结果不仅与 Donets^[10] 一致,而且 $\text{K}\beta, \gamma$ X 射线谱更为明显. 这种现象初步说明 X 射线光谱形状不依赖于靶材料,其物理机制有待进一步分析. 对实验中观测到 Ar^{17+} 离子与 Mo 碰击中的 $\text{K}\alpha$ X 射线强度随入射离子能量增加而增强,以及 $\text{K}\beta, \gamma$ X 射线的强度随入射离子能量增加而减小的现象,目前我们还不能给出合理的解释.

本实验值得关注的另一个主要特征是 Ar 的 $\text{K}\alpha$ X 射线产额非常高,实验测量中要求束流强度非常小,靶电流低于 1nA . 如果实验测量中流强稍大,就会引起探测器因计数率过高而发生阻塞,出现峰位堆积. 在实验测量中,经过反复实验测量,我们选定的流强为 0.24nA . 而在 Ar^{16+} 与 Mo 相互作用中束流强度在 100nA 也不会有信号堆积. 由于 Ar 的 $\text{K}\alpha$ X 射线产额非常高,在设定的测量时间内,离子与靶相互作用过程中靶的 X 射线产额相对比较低没有观测到.

当然,只要延长测量时间,就足以能够测量到靶的射线.

作者对国家实验室 ECR 离子源室提供良好的束流和运行人员的精心操作表示深情感谢.

参考文献 (References)

- 1 Schenkel T, Barnes A V, Niedermayr T R et al. Phys. Rev. Lett., 1999, **83** (21): 4273
- 2 Hattass M, Schenkel T, Barnes A V et al. Phys. Rev. Lett., 1999, **82**(24):4795
- 3 Stolterfoht N, Hoffmann V, Niemann D et al. Phys. Rev., 2000, **A61**(5):052902-1
- 4 Xiao G, Sciiwietz G, Grand P L et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **79**(10):1821
- 5 Briand J P, Thuriel S, Giardino G et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**(8):1452
- 6 Machicoane G A, Schenkel T, Niedermayr T R et al. Physics Review, 2002, **65**(4):2904
- 7 ZHANG Xio-An, ZHAO Yong-Tao, LI Fu-Li et al. Science in China (Series G), 2003, **33**(3):234 (in Chinese)
(张小安, 赵永涛, 李福利等. 中国科学 G 辑, 2003, **33**(3): 234)
- 8 ZHANG Zhi-Min, ZHAO Hong-Wei, ZHANG Xue-Zhen. HEP & NP, 2003, **27**(10):914(in Chinese)
(张子民, 赵红卫, 张雪珍等. 高能物理与核物理, 2003, **27**(10):914)
- 9 Burgdörfer J, Lerner P, Meyer F W. Phys. Rev., 1991, **A44**(9):5674
- 10 Donets E D. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., 1985, **B9**:522

X-Ray in Highly Charged Ar^{17+} Ion Interacting with Mo Surface *

YANG Zhi-Hu^{1,1)} XIAO Guo-Qing¹ CHEN Xi-Meng² ZHANG Yan-Ping¹ ZHAO Yong-Tao¹
ZHANG Xiao-An³ SU Hong¹ CUI Yin² ZHANG Hong-Qiang² XU Xu² SHAO Jian-Xiong²

1(Institute of Modern, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

2(Department of Modern Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

3(Department of Applied Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract The X-ray emission from the highly charged Ar^{17+} ion interacting with Mo surface are measured on the 14.5GHz Electron Cyclotron Resonance ion source facility at Institute of Modern, the Chinese Academy of Sciences in Lanzhou. Ar^{17+} ions came from Electron Cyclotron Resonance ion source and impacted on Mo surface. The incident ion with vacancy of inner shell captures electrons emitted from surface into highly excited Rydberg states, outer shell electron cascades into K vacancy giving rise to $K\alpha$ X-ray emission of the incident ions.

Key words highly charged ion, X-ray emission, metallic Mo surface

Received 25 March 2004

* Supported by National Natural Science Foundation of China (274088, 10134010), The Science and Technology Ministry Foundation of China (2002CCA00900)

1) E-mail: z.yang@impcas.ac.cn