

高电荷态离子轰击 Au 固体表面激发的特征光谱线*

张小安^{1,2} 任惠娟^{1,2} 赵永涛² 肖国青² 杨治虎²

(1 咸阳师范学院物理系, 咸阳 712000)

(2 中国科学院近代物理所, 兰州 730000)

摘要 报道了高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{6+}$ 和 $^{129}\text{Xe}^{30+}$ 轰击金属 Au 表面激发的 200~1000 nm 波段光谱的实验结果. 实验结果表明: 高电荷态离子所激发的靶原子的谱线强度与入射离子的电荷态密切相关, 与入射离子的初动能没有强的相关性.

关键词 高电荷态离子; 经典过垒模型; 谱线强度; 初动能

中图分类号 O433 **文献标识码** A

0 引言

用速度小于 Bohr 速度($v_{\text{Bohr}} = v_0 = 2.19 \times 10^6 \text{ m/s}$)的低速高电荷态离子轰击固体表面, 由于高电荷态重离子的核电荷数 Z 很大并在固体表面产生很强的库仑场(如 1 s 的 U^{91+} 可产生 $2 \times 10^{16} \text{ V/cm}$ 的库仑场), 在这样强的库仑场的作用下, 发生许多新颖的物理现象和非线性过程. 因而是目前国际上广受关注的热点研究领域之一^[1~3]. 与光与物质相互作用不同^[4,5], 离子入射金属固体表面, 靶原子被多电子激发、离子诱导电子发射、离子散射、溅射和光辐射^[6]. 在入射粒子的电荷态不太高时, 在表面内外被俘获电子的光辐射跃迁速率比自电离和 Auger 过程的速率小约 6 个量级, 光辐射退激过程可不予考虑, 因而目前包括高、低电荷态离子与固体表面相互作用的研究大都集中于经自电离和 Auger 过程发射的电子上, 但原子或离子中处于高激发态的电子通过光辐射退激的速率随核电荷数的 4 次方增加, 而自电离和 Auger 过程与入射粒子的核电荷数无强关联^[7], 因此, 随着入射离子的电荷态的增加, 离子俘获导带电子而沉积于表面的能量增加, 激发的靶原子的光辐射退激的能量转移过程随之增加, 靶原子的辐射光谱在研究离子与表面相互作用中将发挥重要作用.

从离子与表面相互作用的过程看, 这种相互作用大体分为两个过程^[8]: 动能相互作用过程和势能相互作用过程. 如果改变入射离子的速度(初动能), 就有可能改变两个作用过程的相对重要性. 在离子与表面相互作用过程中, 电子产额除了是入

射离子的电荷态 q 三倍之外, 还与离子的初动能和入射角有关^[9]. 另外离子的溅射产额与离子的初动能也存在一定的关系^[10]. 对于入射离子的初动能和势能与表面相互作用的激发光谱的研究, 由于光辐射跃迁速率比自电离和 Auger 过程的速率小的原因, 研究工作非常少.

本文报道了在兰州重离子加速器国家实验室 ECR (Electron Cyclotron Resonance) 源用高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{30+}$ 和 $^{129}\text{Xe}^{6+}$ 轰击金属 Au 表面激发的 200~1000 nm 波段光谱的实验结果. 结果发现, 分别用 $^{129}\text{Xe}^{6+}$ 初动能在 $60 \text{ keV} \leq E_k \leq 150 \text{ keV}$ 的范围的离子和 $^{129}\text{Xe}^{30+}$ 初动能在 $150 \text{ keV} \leq E_k \leq 750 \text{ keV}$ 范围的轰击金属 Au 表面时, 靶原子的特征光谱线的激发强度与离子的初动能没有强的关联, 与入射离子的电荷态密切相关. 用经典过垒模型 COB (the classical over-the-barrier model) 解释了其中原因.

1 实验过程

本实验在兰州重离子加速器国家实验室完成, 实验装置已在文献[11]中做了详细的描述. 高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{30+}$ 和 $^{129}\text{Xe}^{6+}$ 由 18 GHz 电子回旋共振离子源 (ECRIS) 提供, 束流在不同的引出电压下引出, 经过聚束器, 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 μ 金属做电磁屏蔽的超高真空(真空维持在 $\sim 10^{-8} \text{ Pa}$)靶室, 与样品表面相互作用.

在本实验中, 束流的束斑直径可控制在 10 mm 范围, 束流强度保持稳定, 离子以 45° 方向入射到经表面净化处理的纯度均为 99.99% 的 Au 固体表面, 其表面积为 $19 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$, 厚度为 2 mm.

入射离子与固体表面相互作用所产生的激发光谱, 利用美国 ARC 公司 (Acton Research corporation) 的单色仪 (Spectrapro-500i) 进行分析.

*国家自然科学基金重点项目(批准号: 10134010)、国家自然科学基金项目(批准号: 10274088)和咸阳师范学院重点科研项目资助

其光栅常数为 1200 g/mm, 闪耀波长为 435.8 nm, 狭缝为 10 μm 时, 分辨为 0.05 nm; 有效扫描范围为 185 ~ 1200 nm, 色散为 1.7 nm/mm. 单色仪入射狭缝与束流方向垂直, 与靶表面成 45° 角. 在本实验中, 入射狭缝的宽度设定为 500 μm , 曝光时间选为 10 s. 单色仪用标准汞灯校准.

在实验过程中, 考虑两类束流情况. 一类为 $^{129}\text{Xe}^{30+}$ 离子初动能分别 150 keV、300 keV、450 keV 和 750 keV, 另一类为 $^{129}\text{Xe}^{6+}$ 初动能分别 60 keV、90 keV、120 keV 和 150 keV. 两者的引出流强均为 μA 量级, 经过四极透镜和光栏的聚焦和准直, 束斑直径为 5 mm, 与靶表面的作用流强为 nA 量级. 实验过程中, 束流强度保持稳定. 整个实验是在暗室条件下完成的, 以保证进行光谱测量时本底最小. 实验中, 我们测量了 $^{126}\text{Xe}^{9+}$ 离子分别作用于 Au 靶所产生的波长在 200 ~ 1000 nm 间的激发光谱. 根据美国国家标准数据库的光谱数据 (NIST Atomic Spectra Database Data), 认定了各条谱线. 本实验中, 波长的测量误差小于 0.03 nm, 测量结果与 NIST 的值偏差在 0.003 ~ 0.08 nm 之间. 谱线强度测量误差小于 10%.

2 实验结果

表 1 给出了离子激发靶原子谱线的实验结果. 表 2 给出了初动能相同 (150 keV)、电荷态不同的离

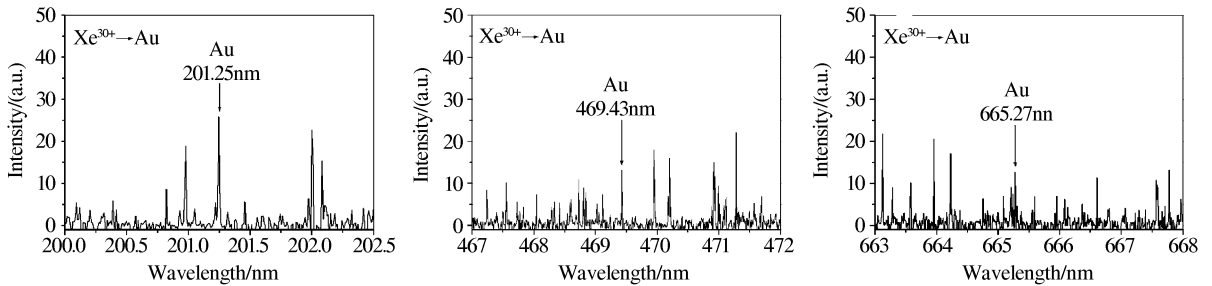


图 1 用 $^{129}\text{Xe}^{30+}$ 5 kV 束流, 入射到 Au 表面, 测量到 Au 的三条谱线 201.25 nm, 469.43 nm 和 665.27 nm

Fig. 1 The spectral lines 201.25 nm, 469.43 nm and 665.27 nm of Au excited by the impact of $^{129}\text{Xe}^{30+}$ ion on the surface of Au

子激发靶原子谱线的用束流归一化后的强度. 图 2 和图 3 的纵轴是归一化了的谱线强度, 横轴是入射离子的初动能. 图 2 中, 用 $^{129}\text{Xe}^{6+}$ 的束流轰击 Au 固体表面, 离子的初动能由 60 keV 增加到 150 keV, 但是靶原子的特征谱线的激发强度没有显著的增加, 激发强度与入射离子的初动能没有强的相关性. 图 3 中, 用 $^{129}\text{Xe}^{30+}$ 的束流轰击 Au 固体表面, 当初动能为 150 keV 时, 三条谱线的激发强度较强, 其中 201.52 nm 的激发强度最大, 759.91. 随着离子的初动能增加, 激发强度反而变小. 当初动能为 750 keV 时, 三条谱线的激发强度最小, 其中 469.43 nm 的激发强度仅为 96, 这表明, 在入射离子为高电荷态情况下, 激发强度与入射离子的初动能没有强的

表 1 实验测到 Au 特征光谱线/nm

离子	实验值	NIST 值 ^a
$^{129}\text{Xe}^{30+}$	201.25	201.20
	335.55	335.52
	347.19	347.16
	361.41	361.40
	469.43	469.47
	586.33	586.29
$^{129}\text{Xe}^{6+}$	665.27	665.29
	201.26	201.20
	397.92	397.97
	469.42	469.47
	526.17	526.18
	665.31	665.29

表 2 初动能相同 (150 keV)、电荷态不同的离子激发靶原子谱线的用束流归一化后的强度

离子	Au 特征光谱线/nm	强度/a. u.
$^{129}\text{Xe}^{6+}$	201.25	19.25
	469.43	18.19
	665.30	17.96
$^{129}\text{Xe}^{30+}$	201.25	751.91
	469.43	457.09
	665.30	521.46

子激发靶原子谱线的用束流归一化后的强度. 图 1 的三条光谱线为高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{30+}$ 、初动能 150 keV 轰击 Au 表面激发的 Au 原子的特征光谱线. 201.25 nm, 强度为 25.87; 469.43 nm, 强度为 13.12; 665.27 nm, 强度为 12.68.

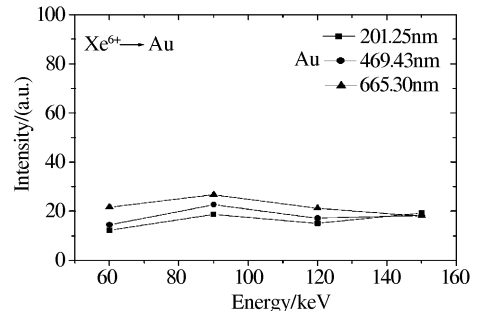


图 2 纵轴为归一化的谱线强度, 横轴为束流 $^{129}\text{Xe}^{6+}$ 的初动能

Fig. 2 Normalized spectral line intensity versus initial kinetic energy of the incident ion $^{129}\text{Xe}^{6+}$

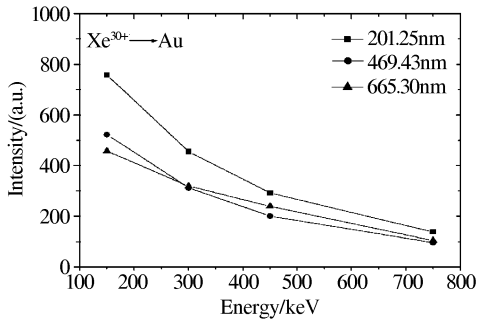


图3 纵轴为归一化的谱线强度,横轴为束流 $^{129}\text{Xe}^{30+}$ 的初动能

Fig. 3 Normalized spectral line intensity versus initial kinetic energy of the incident ion $^{129}\text{Xe}^{30+}$

3 讨论

在高电荷态离子入射金属固体表面过程中,离子与表面之间产生势垒,同时,离子与金属表面相互作用,发生金属导带电子的集体响应,形成镜像势,它加速了高电荷态离子向靶的运动,这就为离子轰击表面的有效速度设定了下限和相互作用时间设定了上限.另外,镜像相互作用使入射离子弱束缚的电子态发生移动,使离子与表面之间的势垒高度降低至 Fermi 能级以下,使 Fermi 面附近的电子转移到入射离子上成为可能,即离子俘获电子.根据经典过垒模型 COB(classic over-barrier model)^[12],当高电荷态离子运动到与表面距离 R_c

$$R_c = \frac{e}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sqrt{8q+2}}{2W} \quad (1)$$

(式中 q 为离子的电荷态, W 为金属的功函数)时,开始俘获金属电子.通过俘获电子,高电荷态离子释放所携带的势能,使靶原子受激辐射特征光谱线.另一方面,高电荷态离子会在高激发态的外壳层空位上俘获多个电子,从而形成处于高激发态的空心原子,这些高激发态的空心原子逼近金属固体表面时退激,使表面的靶原子受激,进而辐射其特征光谱线,入射离子的电荷态越高,俘获靶原子的电子越多,沉积在金属靶表面的势能越大,形成的高激发态的空心原子越多,使更多的靶原子激发,因而退激辐射较强的特征光谱线.

除了上述过程使靶原子受激辐射之外,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 ^[13]

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

增益的能量也沉积在靶表面,加强了靶原子受激辐射.

综上所述,靶原子的特征光谱线的激发强度与离子的电荷态 q 紧密相关.入射离子的电荷态越

高,靶原子的特征光谱线激发强度越大.在图3中,入射 Au 靶表面离子的电荷态为 $q=30+$,而图2入射 Au 靶表面离子的电荷态为 $q=6+$,因此,图3显示的激发强度大于图2显示的激发强度.影响靶原子的激发强度的另一原因是离子和表面的作用时间,这个时间在离子轰击表面的有效速度的下限和相互作用时间的上限的范围内,由离子的初动能决定.初动能越大,离子与表面相互作用的时间越短,俘获靶原子的电子越少,沉积靶表面的势能越小,激发的靶原子越少,辐射的谱线的强度就小.所以入射离子的初动能与靶原子的特征谱线的激发强度表现为图3所示的趋势.在图2中,离子的初动能在 $60\text{ keV} \leq E_k \leq 150\text{ keV}$ 范围,属于低速高电荷态离子,靶原子激发是由于离子俘获其电子而沉积与表面的势能相关,与离子的初动能没有强的相关性,因此,离子的初动能从 60 keV 增加到 150 keV ,靶原子的谱线强度没有明显的增强,正如图2所示.谱线的激发强度与离子的电荷态密切相关,如表1中给出的 150 keV 的 Xe^{30+} 比 150 keV 的 Xe^{6+} 的激发强度大许多.

4 结论

高速单电荷态离子溅射固体表面所激发的靶原子的光谱线强度随着离子动能的增加而增加^[14],低速高电荷态离子入射金属固体表面,靶原子的特征谱线的激发强度与入射离子的电荷态 q 密切相关.而与离子的初动能没有强的关联.

衷心感谢兰州重离子加速器国家实验室 ECR 源全体人员的有效合作

参考文献

- 1 Machicoane G A, Schenkel T, Newmann M W, et al. Internal dielectronic excitation in highly charged ions colliding with surfaces. *Phys Rev(A)*, 2002, **65**(4): 1~7
- 2 Hattass M, Schenkel T, Hamza A V, et al. Charge equilibration time of slow, highly charged ions in solids. *Phys Rev Lett*, 1999, **82**(24): 4795~4798
- 3 Robin A, Niemann D, Stolterfoht N, et al. Highly charged ions impinging on a stepped metal surface under grazing incidence. *Phys Rev(A)*, 2003, **67**(5): 1~7
- 4 戴能利,张德宝,胡丽丽,等. Er^{3+} 单掺及 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-La}_2\text{O}_3$ 玻璃光谱性质研究. *光子学报*, 2003, **32**(2): 112~116
Dai N L, Zhang D B, Hu L L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(1): 112~116
- 5 杨建虎,戴世勋,温磊,等. 掺铒铋酸盐玻璃的光谱性质研究. *光子学报*, 2002, **31**(11): 1382~1386
Yang J H, Dai S X, Wen L, et al. *Acta Photonica Sinica*,

- 2002, **31**(11):1382 ~ 1386
- 6 Briand J P, Giardion G, Borsoni G. The interaction of Slow highly charged ions on surface. *Review of Scientific Instruments*, 2000, **71**(2): 627 ~ 630
- 7 Winter H, Aumayr F. Hollow atoms. *J Phys Phys (B)*, 1999, **32**(7):39 ~ 65
- 8 Briand J P, Giardino G, Borsoni G, *et al.* The interaction of slow highly charged ions on surfaces. *Review of Scientific Instruments*, 2000, **71**(2): 627 ~ 630
- 9 Schenkel T, Barnes A V, Niedermayr T R, *et al.* Deposition of potential energy in solids by slow, highly charged ions. *Phys Rev Lett*, 1999, **83**(21): 4273 ~ 4276
- 10 Meyer F W, Yan Q, Emmichoven Z V, *et al.* On the neutralization of singly and multicharged projectiles during grazing interactions with LiF(100). *Nucl Instrum Methods (B)*, 1997, **125**(1):138 ~ 149
- 11 Zhang Xiao'an, Zhao Yongtao, Li Fuli, *et al.* 200-1000 nm Spectra of light emitted in the impact of $^{40}\text{Ar}^{10}$ upon Al and Si Solid Surfaces. *Science in China Series G*, 2003, **46**(5): 528 ~ 534
- 12 Burgdörfer J, Lerner P, Meyer F W. Above-surface neutralization of highly charged ions: The classical over-the-barrier model. *Phys Rev(A)*, 1991, **44**(9): 5674 ~ 5685
- 13 Ducrée J J, Casali F, Thumm U. Extended classical over-barrier model for collisions of highly charged ions with conducting and insulating surfaces. *Phys Rev(A)*, 1998, **57**(1): 338 ~ 350
- 14 Wang Guanghou. *Physics of Interaction of Particles with Solid (Volume One)*. Beijing: Science Press, 1988. 393

The Characteristic Spectral Lines Induced by the Impact of Highly Charged Ion on Au Solid Surface

Zhang Xiao'an^{1,2}, Ren Huijuan^{1,2}, Zhao Yongtao², Xiao Guoqing², Yang Zhihu²

¹ Department of Physics, Xian Yang Teacher's College, Xianyang 712000

² Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

Received date: 2003-09-16

Abstract The measurement of light spectrum with wavelength from 200 nm to 1000 nm emitted from solid surface of Au which is excited by slow highly charged ions $^{129}\text{Xe}^{30+}$ and $^{129}\text{Xe}^{6+}$ is reported. The result shows that the intensity of the characteristic spectral lines of the target atom is intimate relation with the charge state q of incident ions and hadn't strong correlation with the initial kinetic energy of the incident ions.

Keywords Highly charged ion; Classical over-the barrier model; Spectral lines intensity; Initial kinetic energy

Zhang Xiao'an was born in 1962, received his master degree from Shaanxi Normal University in 2000. Now he is the Ph. D. candidate in Xi'an Jiaotong University and an assistant professor at physics department of Xianyang Teacher's College. His research interests are in the physics of highly charged ions.

