

不同动能的 $^{129}\text{Xe}^{26+}$ 与Au表面作用产生的X射线谱*

梁昌慧¹⁾ 张小安^{1)†} 李耀宗¹⁾ 赵永涛²⁾ 肖国青²⁾

1) (咸阳师范学院离子束与光物理实验室, 咸阳 712000)

2) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

(2013年12月31日收到; 2014年5月6日收到修改稿)

测量了动能为350—600 keV和1.8—3.9 MeV的 $^{129}\text{Xe}^{26+}$ 入射Au表面产生的X射线谱. 结果表明, 350—600 keV的 Xe^{26+} 仅激发了Au的 $M\alpha$ 特征X射线, 而1.8—3.9 MeV的 Xe^{26+} 可激发出Au的 $M\zeta$, $M\alpha$, $M\gamma$ 和 $M\delta$ 特征X射线. 分析了X射线强度和产额比与入射离子动能的关系, 并估计了 Xe^{26+} 激发Xe的L-X射线的动能阈值.

关键词: 高电荷态离子, X射线, 产额, 动能阈值

PACS: 32.30.Rj, 32.70.Jz, 34.50.Fa

DOI: 10.7498/aps.63.163201

1 引言

重离子与靶物质相互作用时, 除了存在少量的核反应过程以外, 大量的相互作用是碰撞电离过程、电子俘获过程、退激辐射过程及其相关联的多体过程等原子物理过程, 这些过程均可以通过测量其辐射谱进行研究^[1,2]. 随着实验室等离子体研究的进展, 原子的特征X射线, 尤其是原子的特征X射线的产额、激发条件等成为研究的重要课题^[3]. 原子的特征X射线谱在研究原子物理学、核物理学、等离子体物理学和天体物理学等领域中有着重要应用. 同时, 对原子结构和X射线谱的研究, 不仅在量子电动力学、激光物理、材料物理等基础领域有重要的研究价值, 而且在纳米刻蚀和小型纳米器件、表面分析技术、特殊性质的离子注入等方面极具应用价值^[4-7].

我们在前期研究中, 由于加速电压较低, 入射离子动能小于1 MeV, 虽然在获取的X射线谱中发

现了大量靶原子的特征X射线, 但离子的特征X射线较少, 而且X射线能量一般低于4 keV. 目前, 随着离子源技术和加速器技术的迅速发展, 对重离子与物质相互作用产生X射线的产额与动能的相关性研究还有待于进一步深入. 当入射离子的动能达到MeV量级时, 离子速度接近或超过Bohr速度(2.19×10^6 m/s), 该条件下离子动能对相互作用过程的影响显著增强, 离子与固体表面非弹性碰撞的激烈程度增强, 碰撞可导致离子及靶原子深层电子受激形成多个内壳层空穴, 产生更多、能量更高的入射离子及靶原子的特征X射线^[8-10]. 这个过程主要包括单电离、多重电离、单次俘获、多电子俘获及分子轨道跃迁等物理机理, 当靶原子内壳层电离度较高时, 会产生一些与单电离情况不同的实验现象, 理论与实验结果会有较大差别, 对此理论解释的难度较大^[11].

我们在兰州重离子加速器国家实验室电子回旋共振离子源(ECRIS)原子物理实验平台和320 kV高电荷态离子综合研究平台上, 用动

* 国家自然科学基金(批准号: 11075135)、陕西省自然科学基金(批准号: 2010JM1012)和陕西省教育厅科研计划(批准号: 14JK1803)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhangxiaoran2000@126.com

能为350—600 keV的 $^{129}\text{Xe}^{26+}$ 离子束和动能为1.8—3.9 MeV的 $^{129}\text{Xe}^{26+}$ 离子束分别入射Au表面,测量了离子与Au表面相互作用过程中辐射的X射线谱.研究了Au特征X射线谱的强度和产额比与离子动能的关系,分析了激发Xe的L-X射线的离子动能阈值.

2 实验

本实验分两部分完成.首先,在最大加速电压为25 kV的ECRIS原子物理实验平台上进行了动能为350—600 keV的 $^{129}\text{Xe}^{26+}$ 离子束入射Au表面产生X射线谱实验.实验装置和对探测器的刻度请参见文献[12].高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{26+}$ 由ECRIS提供,束流的束斑直径控制在5 mm范围内,束流强度为nA量级,离子以 45° 角斜入射于经过表面净化处理的化学纯度为99.9%的Au固体表面,Au面积为 $19\text{ mm} \times 24\text{ mm}$,厚度为0.1 mm.相互作用所产生的X射线谱利用口径为10 mm的Si(Li)探测器进行观测,探测器距离靶点80 mm,探测时间选为5400 s.

其次,在最大加速电压为320 kV的高电荷态离子综合研究平台1#实验终端进行了动能为1.8—3.9 MeV的 $^{129}\text{Xe}^{26+}$ 离子束入射Au表面产生X射线谱实验.实验装置和对探测器的刻度请参见文献[13].高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{26+}$ 由ECRIS提供,实验中选择的Au靶面积约为 $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$,厚度为0.1 mm,束流的束斑直径被控制在7 mm范围内,垂直轰击靶表面中心.探测器的探头对准靶表面的中心位置,并与入射束流方向成 45° 角,探测口的几何立体角为0.0066 sr,入射离子由离子计数器计数,每个计数对应的电量为 10^{-9} C .

3 实验结果及讨论

3.1 动能为600 keV的 Xe^{26+} 与Au作用产生的X射线谱

实验中选择了动能为350, 400, 450, 500, 550和600 keV的 Xe^{26+} ,入射Au靶表面,图1是动能为600 keV的 $^{129}\text{Xe}^{26+}$ 入射Au靶表面激发X射线谱的实验结果(对谱线进行了高斯拟合).实验得到的X射线谱峰位于2.163 keV处,与文献[14]的Au的 $M\alpha$ 的峰位值相对偏差为1.88%,这说明位于

2.163 keV处的峰为Au的 $M\alpha$ 特征X射线,是组态为 $N^2F_{7/2}$ 到 $M^2D_{5/2}$ 的偶极跃迁.

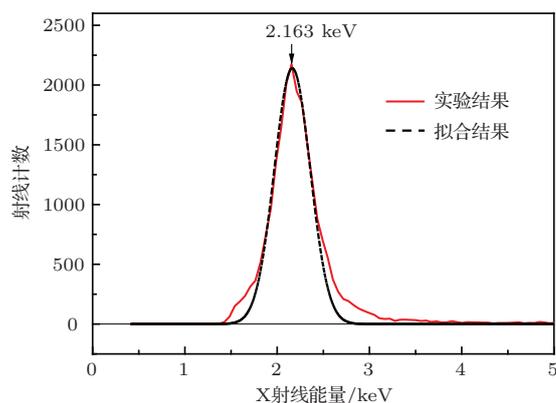


图1 动能为600 keV的 $^{129}\text{Xe}^{26+}$ 入射Au表面激发的X射线谱

按照经典过垒模型,高电荷态离子以小于Bohr速度的低速入射金属表面运动至临界距离 R_c 时[15],开始俘获金属导带电子并使之发生共振转移至入射离子的高 n 壳层,形成空心原子(hollow atom).离子在靶表面很小的区域释放的势能和金属表面对离子产生镜像加速所增加的能量使Au原子M壳层的电子被激发、离化,形成空穴,N壳层电子填充M壳层空穴,辐射 $M\alpha$ 特征X射线.

3.2 动能为1.8—3.9 MeV的 Xe^{26+} 与Au作用产生的X射线谱

实验中选择了动能为1.8, 2.4, 2.7, 3.0, 3.6和3.9 MeV的 Xe^{26+} 离子入射Au靶表面,产生的X射线谱如图2所示.实验得到的4个谱峰分别位于1.662, 2.165, 2.420和2.823 keV处.通过与文献[14]提供的数据对比后可知,这4个峰依次为Au的 $M\zeta$, $M\alpha$, $M\gamma$ 和 $M\delta$ 特征X射线,分别是组态 $N^2P_{3/2}$ 到 $M^2D_{5/2}$, $N^2F_{7/2}$ 到 $M^2D_{5/2}$, $N^2D_{5/2}$ 到 $M^2P_{3/2}$, $N^2D_{3/2}$ 到 $M^2P_{1/2}$ 的偶极跃迁,图2(a)中的峰位值与文献[14]中的峰位值相对偏差分别为0.01%, 1.98%, 0.05%, 1.36%.由于高电荷态离子与原子碰撞过程中会引起靶原子内壳层的多电离,而多电离会扰动轨道电子的结合能,减小轨道电子对原子的屏蔽,使得X射线的发射向着高能方向移动[16],因而相对于文献[14]的峰位值,图1和图2中的X射线谱的峰位值都偏大.

在图2中,入射离子最小动能为1.8 MeV,速度为 $1.63 \times 10^6\text{ m/s}$ (与Bohr速度同一量级),当垂直入射时,离子在上表面过程经历的时间约为

1.25×10^{-15} s, 远小于高 Rydberg 态原子的退激时间^[17]. 因此, 入射离子上表面过程俘获的高 n 电子没有足够的时间退激, 而入射离子下表面过程的势能沉积是由其高电子退激实现的, 所以实验探测到的 X 射线是入射离子大量动能在下表面过程沉积的结果^[18].

对于不同动能的 Xe 离子, X 射线谱的谱型相同, 随着入射能量的增加, X 射线谱的峰位保持不变, 而强度却随之增大. 这是因为 Xe 离子与 Au 相互作用过程中, 会与 Au 原子中的多个电子同时作用引起 Au 原子内壳层多电离的发生, Au 原子内壳层的电子数会因此减少 (和单电离相比较而言). 实验测量得到的 M 射线对应于 $N \rightarrow M$ 的跃迁, 当 M 壳层之外的电子数减少时, 其支壳层空穴退激后通过无辐射跃迁产生俄歇电子的概率就会降低, 而通过辐射跃迁产生 X 射线的概率就会增加, 最终使得发射的 X 射线强度随之增加^[19].

但当 Xe^{26+} 的入射动能为 3.0 MeV 时, Au 的特征 X 射线的强度反而减小. 这是因为此时会激发 Xe 的 L-X 射线, 说明 Xe 的 L 壳层已形成空穴, 激发 Xe 的 L 壳层电子消耗了离子的大量动能, 同时, Xe 离子受到的电子阻止作用显著增强, 动能损失也明显加剧.

图 3(a), (b) 分别是动能为 3.0, 3.6 MeV 的

Xe^{26+} 与 Au 表面相互作用产生的 X 射线谱的局部放大图. 从图 3 可以看出, 当入射离子动能达到 3.0 MeV 时, X 射线谱中出现了两个能量大于 4 keV 的峰, 但峰的强度较小, 当动能为 3.6 MeV 时, 峰的强度明显增大. 根据文献^[14]提供的数据可以断定, 图 3 中标出的两支峰分别是 Xe 的 $L\alpha$ 和 $L\delta$ 特征 X 射线, 峰值位与文献值的相对偏差分别为 0.73% 和 0.72%, 在探测分辨率允许的范围内. 所以, 可以认为在本文实验条件下 Xe^{26+} 离子激发 Xe 的 L-X 射线的动能阈值为 3.0 MeV, 而文献^[16]计算得到的 Xe^{q+} 离子入射 Au 靶产生 Xe 的 L-X 射线的动能阈值为 0.659 MeV. 理论和实际的差别较大, 主要有以下两方面的原因: 一是此动能阈值是应用半经典近似理论, 考虑入射离子与靶原子正面碰撞时计算得到, 而高电荷态离子与金属表面相互作用是一个复杂的多体问题, 应用半经典近似理论处理有些不妥, 而且正碰的概率极低; 二是实验中存在能量损耗. 在离子与原子碰撞过程中, 当 Xe^{26+} 与 Au 原子接近到一定程度后, 离子和原子中电子数处于饱和状态的壳层已无法再容纳电子, Xe 的 L 壳层电子轨道与 Au 的 L 壳层电子轨道发生交叠, 电子相互排斥. 由于 Au 的 L 壳层电子最低束缚能为 11.919 keV, 而 Xe 的 $2p_{1/2}$ 和 $2p_{3/2}$ 态电子束缚能分别为 5.107 和 4.786 keV^[14], 电子排斥作用可导致 Xe

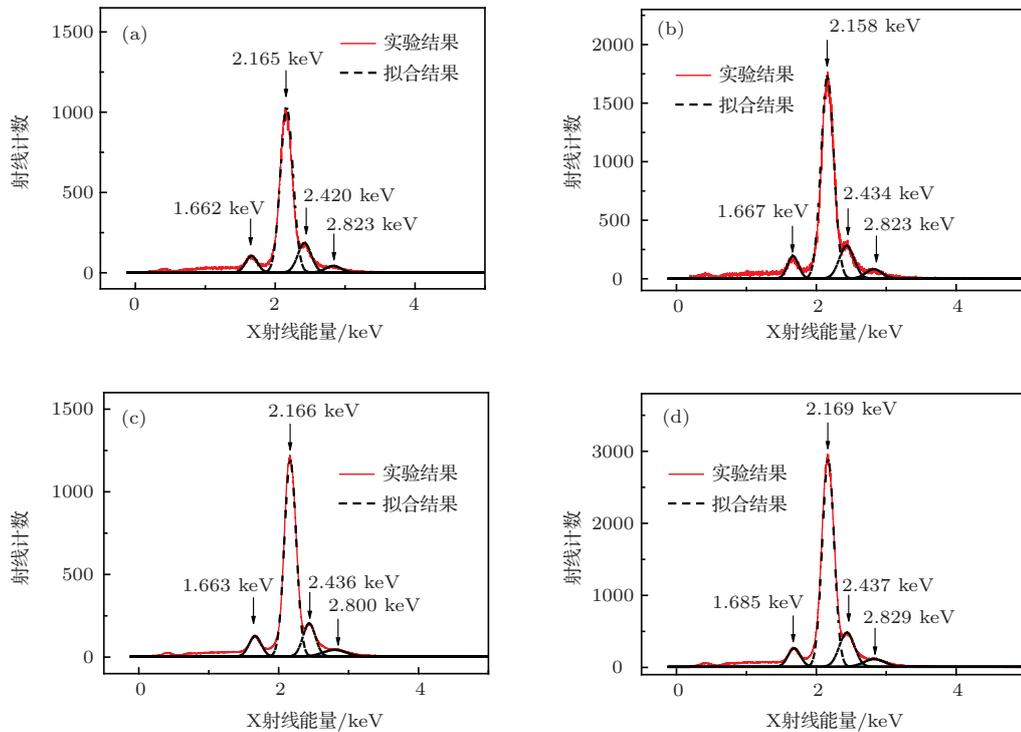


图 2 动能为 1.8, 2.4, 3.0, 3.6 MeV 的 Xe^{26+} 入射 Au 表面产生的 X 射线谱 (a) 1.8 MeV; (b) 2.4 MeV; (c) 3.0 MeV; (d) 3.6 MeV

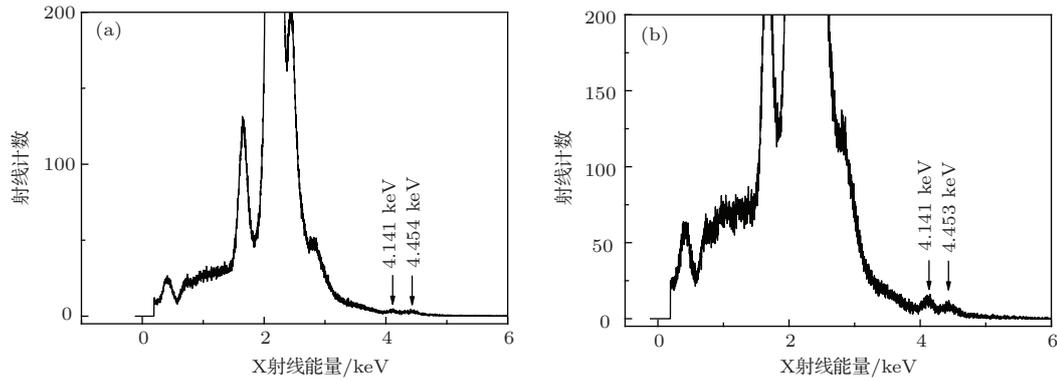


图3 动能为3.0, 3.6 MeV的Xe²⁶⁺入射Au表面激发的X射线谱局部放大图 (a) 3.0 MeV; (b) 3.6 MeV

的2p_{1/2}和2p_{3/2}态的部分电子被激发,与Au共用2p态电子.离子与原子达到最近距离后,在彼此核电荷强排斥作用下,相互分离,分离后的Xe出现L壳层空穴.

3.3 Au的特征X射线的产额比随入射能量的变化

根据本文实验条件和测量条件(离子在靶中的最大穿透深度远小于靶的厚度),假设X射线发射是各向同性的,考虑到探测器定标后的道宽为0.00175 keV,可以给出Xe²⁶⁺作用于Au表面的单离子X射线相对产额^[12]

$$Y = \frac{C}{N} = \frac{A/0.00175}{Q/(qe)} \frac{4\pi}{\Omega \eta}, \quad (1)$$

其中, N 为总离子数, C 为X射线总计数, Q 为离子计数器计得的电量值, q 为入射离子的电荷态, e 为电子电量, A 为峰面积, Ω 为探测器的立体角(本文实验为0.0066 sr), η 为探测器的探测效率(当X射线能量分别为1.67, 2.23, 2.42和2.82 keV时,探测效率依次为0.530, 0.725, 0.753, 0.850).表1列出了Au的单离子X射线的相对产额比与入射离子动能的关系.产额误差主要来自于X射线的计数统计误差、X射线谱中实验本底噪声所引起的误差和拟合靶特征X射线谱时由于伴线位置的不确定度所引起的误差.从表1可以看出,产额比基本上不随入射离子能量的变化而变化,因为只有碰撞作用后的靶原子参数(包括荧光产额、CK跃迁概率等)会对该产额比产生影响,而靶原子参数依赖于入射离子原子序数 Z_1 ,所以当 Z_1 相同时,作用过程中对应的靶原子参数也相同.因此,产额比是不随入射离子能量变化的,这与我们实验中观察到的现象一致,也与文献^[11]报道的情况一致.

表1 Au的单离子X射线的相对产额比与入射离子动能的关系

入射离子动能/MeV	Y_{ζ}/Y_{δ}	Y_{α}/Y_{δ}	Y_{γ}/Y_{δ}	Y_{δ}/Y_{δ}
1.8	3.04	23.60	4.35	1
2.4	2.60	23.01	3.60	1
2.7	2.89	19.14	4.15	1
3.0	2.63	17.65	3.07	1
3.6	2.27	18.00	3.66	1
3.9	2.51	20.10	3.80	1

4 结 论

本文分别观测和分析了动能为350—600 keV和1.8—3.9 MeV的Xe²⁶⁺入射Au表面产生的X射线谱.实验结果表明:350—600 keV的Xe²⁶⁺仅激发出Au的M α 特征X射线,而1.8—3.9 MeV的Xe²⁶⁺激发出了Au的M ζ , M α , M γ 和M δ 特征X射线,X射线的强度基本上随入射离子动能的增加而增加;产额比基本上不随入射离子能量的变化而变化.当入射离子动能达到3.0 MeV时,X射线谱中出现了Xe的L α 及L δ 特征X射线,据此认为Xe²⁶⁺激发Xe的L-X射线的动能阈值为3.0 MeV.

对兰州重离子加速器国家实验室ECRIS和320 kV高电荷态离子综合研究平台的研究人员在实验上提供的帮助和有益的讨论表示衷心感谢.

参考文献

- [1] Schenkel T, Hamza A V, Barnes A V, Schneider D H 1999 *Prog. Surf. Sci.* **61** 23
- [2] Aumayr F, Winter H P 2005 *Nucl. Instrum. Meth. B* **233** 111

- [3] Phillips K J H, Mewe R, Harra-Murnion L K, Kaastra J S, Beiersdorfer P, Brown G V, Liedahl D A 1999 *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **138** 381
- [4] Yang Z H, Du S B, Zeng X T, Chang H W, Zhang B L, Wang W, Yu D Y, Cai X H 2009 *Astron. J.* **137** 4020
- [5] Ma X W, Zhang R T, Zhang S F, Zhu X L, Feng W T, Guo D L, Li B, Liu H P, Li C Y, Wang J G, Yan S C, Zhang P J, Wang Q 2011 *Phys. Rev. A* **83** 052707
- [6] Luo X W, Hu B T, Zhang C J, Wang J J, Chen C H 2010 *Phys. Rev. A* **81** 052902
- [7] Zhang X A, Zhao Y T, Hoffmann D, Yang Z H, Chen X M, Xu Z F, Li F L, Xiao G Q 2011 *Laser Part. Beams* **29** 265
- [8] Liang C H, Zhang X A, Li Y Z, Zhao Y T, Mei C X, Cheng R, Zhou X M, Lei Y, Wang X, Sun Y B, Xiao G Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 063202 (in Chinese) [梁昌慧, 张小安, 李耀宗, 赵永涛, 梅策香, 程锐, 周贤明, 雷瑜, 王兴, 孙渊博, 肖国青 2013 物理学报 **62** 063202]
- [9] Zhou X M, Zhao Y T, Ren J R, Cheng R, Lei Y, Sun Y B, Xu G, Wang Y Y, Liu S D, Xiao G Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 113402
- [10] Mei C X, Zhang X A, Zhao Y T, Zhou X M, Ren J R, Wang X, Lei Y, Sun Y B, Cheng R, Wang Y Y, Liang C H, Li Y Z, Xiao G Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 103403
- [11] Wang X, Zhao Y T, Cheng R, Zhou X M, Xu G, Sun Y B, Lei Y, Wang Y Y, Ren J R, Yu Y, Li Y F, Zhang X A, Li Y Z, Liang C H, Xiao G Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 193201 (in Chinese) [王兴, 赵永涛, 程锐, 周贤明, 徐戈, 孙渊博, 雷瑜, 王瑜玉, 任洁茹, 虞洋, 李永峰, 张小安, 李耀宗, 梁昌慧, 肖国青 2012 物理学报 **61** 193201]
- [12] Liang C H, Zhang X A, Li Y Z, Zhao Y T, Xiao G Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6059 (in Chinese) [梁昌慧, 张小安, 李耀宗, 赵永涛, 肖国青 2010 物理学报 **59** 6059]
- [13] Liang C H, Zhang X A, Li Y Z 2013 *Nucl. Phys. Rev.* **30** 63 (in Chinese) [梁昌慧, 张小安, 李耀宗 2013 原子核物理评论 **30** 63]
- [14] Albert C T, Janos K, David T A, Eric M G, Malcolm R H, Jeffrey B K, Yan W L, Arthur L R, James H U, Kwang J K, Ingolf L, Piero P, Herman W, Gwyn P W, James H S 2009 *X-ray Data Booklet* (Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory) p16
- [15] Burgdörfer J, Lerner P, Meyer F W 1991 *Phys. Rev. A* **44** 5674
- [16] Awaya Y, Kambara T, Kanai Y 1999 *Int. J. Mass Spectrom.* **192** 49
- [17] Zou X R, Shao J X, Chen X M, Cui Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6064 (in Chinese) [邹贤容, 邵剑雄, 陈熙萌, 崔莹 2010 物理学报 **59** 6064]
- [18] Li Y Z, Zhang X A, Liang C H, Zhao Y T, Cheng R, Zhou X M, Wang X, Lei Y, Sun Y B, Xu G, Li J Y, Xiao G Q 2011 *J. At. Mol. Phys.* **28** 795 (in Chinese) [李耀宗, 张小安, 梁昌慧, 赵永涛, 程锐, 周贤明, 王兴, 雷瑜, 孙渊博, 徐戈, 李锦玉, 肖国青 2011 原子与分子物理学报 **28** 795]
- [19] Singh Y, Tribedi L C 2002 *Phys. Rev. A* **66** 062709

X-ray spectrum emitted by the impact of $^{129}\text{Xe}^{26+}$ of the different kinetic energies on Au surface*

Liang Chang-Hui¹⁾ Zhang Xiao-An^{1)†} Li Yao-Zong¹⁾
Zhao Yong-Tao²⁾ Xiao Guo-Qing²⁾

1) (*Ion Beam and Optical Physical Laboratory, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, China*)

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

(Received 31 December 2013; revised manuscript received 6 May 2014)

Abstract

The characteristic X-ray spectra produced by the impact of $^{129}\text{Xe}^{26+}$ with kinetic energies from 350 to 600 keV and from 1.8 to 3.9 MeV on Au surface are measured. It is found that $^{129}\text{Xe}^{26+}$ with kinetic energies from 350 to 600 keV can excite only the characteristic X-ray spectra of $M\alpha$ of Au, but $^{129}\text{Xe}^{26+}$ with kinetic energies from 1.8 to 3.9 MeV can excite the characteristic X-ray spectra of $M\zeta$, $M\alpha$, $M\gamma$ and $M\delta$. The relation between the characteristic X-ray intensity, the ratio of X-ray yield and the ion kinetic energy is analyzed. The kinetic energy threshold of L-X-ray of Xe emitted by Xe^{26+} is estimated.

Keywords: highly charged ions, X-ray, yield, kinetic energy threshold

PACS: 32.30.Rj, 32.70.Jz, 34.50.Fa

DOI: 10.7498/aps.63.163201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11075135), the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2010JM1012), and the Scientific Research Program of the Education Bureau of Shaanxi Province, China (Grant No. 14JK1803).

† Corresponding author. E-mail: zhangxiaoan2000@126.com