

不同离子激发 Au 靶的多电离效应

梁昌慧 张小安 李耀宗 赵永涛 周贤明 王兴 梅策香 肖国青

Multiple ionization effect of Au induced by different ions

Liang Chang-Hui Zhang Xiao-An Li Yao-Zong Zhao Yong-Tao Zhou Xian-Ming Wang Xing Mei Ce-Xiang Xiao Guo-Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 243201 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181642

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181642>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

洞态 Ar 原子 K_α 和 K_β 伴线和超伴线的理论计算

Theoretical calculation of K_α and K_β X-ray satellite and hypersatellite structures for hollow argon atoms
物理学报.2018, 67(17): 173201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180553>

不同电荷态的 $^{129}\text{Xe}^{q+}$ 激发 Au 的 X 射线发射研究

Study of X-ray spectrum emitted due to the impact of $^{129}\text{Xe}^{q+}$ on different ion's charge on Au
物理学报.2015, 64(5): 053201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.053201>

Eu^{20+} 入射 Au 靶发射 Eu L-X 射线产额与动能的相关性

Correlation of Eu L X-ray yield with kinetic energy based on the impact of Eu^{20+} on solid Au target
物理学报.2014, 63(16): 163202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.163202>

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

X-ray spectrum emitted by the impact of $^{129}\text{Xe}^{26+}$ of the different kinetic energies on Au surface
物理学报.2014, 63(16): 163201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.163201>

近 Bohr 速度的 $^{152}\text{Eu}^{20+}$ 入射 Au 表面产生的 X 射线谱

X-ray spectrum emitted by the impact of $^{152}\text{Eu}^{20+}$ of near Bohn velocity on Au surface
物理学报.2013, 62(6): 063202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.063202>

不同离子激发 Au 靶的多电离效应*

梁昌慧¹⁾ 张小安^{1)3)†} 李耀宗¹⁾ 赵永涛²⁾³⁾ 周贤明³⁾ 王兴²⁾
梅策香¹⁾ 肖国青³⁾

1) (咸阳师范学院与中国科学院近代物理研究所联合共建: 离子束与光物理实验室, 咸阳 712000)

2) (西安交通大学理学院, 西安 710049)

3) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

(2018年9月3日收到; 2018年11月5日收到修改稿)

重离子与固体表面相互作用时, 会引起靶原子内壳层的电离, 相应空穴退激过程中发射的 X 射线对研究重离子与固体表面的相互作用有着重要意义, 可为相关研究提供基础数据. 目前, 在 K 和 L 壳层电离方面做了一些工作, 而 M 壳层的研究较少, 本文依托兰州重离子加速器国家实验室 320 kV 高电荷态离子综合研究平台, 测量了不同能量的 H^+ , Ar^{8+} , Ar^{12+} , Kr^{13+} 和 Eu^{20+} 离子与 Au 表面作用产生的特征 X 射线谱及其能移, 计算了 X 射线的产额比值. 结果表明: 重离子引起了靶原子内壳层的多电离, 多电离效应使 Au 的 M X 射线有不同程度的能移; 多电离程度取决于入射离子能量、离子的原子序数和其外壳层的空穴数量.

关键词: 重离子, X 射线, 能移, 多电离效应

PACS: 32.30.Rj, 34.50.Fa, 34.80.Dp, 79.20.Rf

DOI: 10.7498/aps.67.20181642

1 引言

在理论和应用方面, 作为原子碰撞物理学的一个重要领域, 原子的内壳层被重离子电离的研究在近几年来受到广泛关注, 并取得了重要进展^[1-8]. 重离子与固体表面相互作用时, 会引起靶原子内壳层的电离, 相应空穴的退激伴随着 X 射线、俄歇电子的发射及 Coster-Kronig (CK) 过程的无辐射跃迁. X 射线发射对研究重离子与固体表面的相互作用有着重要作用, 为相关研究提供了基础数据. 在惯性约束聚变实验中, 通常将高 Z 材料制成靶腔, 利用 X 射线辐射对弹丸进行加热, 如何提高离子束与靶腔相互作用的 X 射线辐射的传输效率是目前的热点研究^[9,10]. 在极端条件下, 原子的多重电离和重新复合过程对辐射强度、辐射线型及能移会产生直接影响. 通过多重电离诱发的 K, L 和 M 伴线能够相对准确地给出等离子体的密度、温度等重要参量, 成为高温高密等离子体诊断中的重

要方法之一^[9,11-13]. 另外, Au 等离子体产生的 X 光光谱及其各种离子态的能级寿命包含着等离子体状态参量和等离子体中发生过程的大量信息, 同时 Au 在惯性约束聚变、磁约束聚变的等离子体诊断学中也有重要作用^[14,15].

当入射离子动能较高时, 离子速度接近或超过玻尔速度, 该条件下离子动能对相互作用过程的影响显著增强, 碰撞可产生一些与单电离不同的多重电离、多电子俘获及分子轨道跃迁等物理机制^[16,17]. 近年来, 我们在 K 和 L 壳层电离方面做了一些工作, 周贤明等研究了 1.0—3.0 MeV 的 Ar^{11+} 与 Si 作用时靶原子的 K 壳层的多电离, 认为考虑了多电离的影响后, 靶原子内壳层的电离过程可以看成半经典的两体碰撞过程^[18]. 而 M 壳层过程的研究较少, 因为它有 5 个支壳层 ($3s_{1/2}$, $3p_{1/2}$, $3p_{3/2}$, $3d_{3/2}$ 和 $3d_{5/2}$), 会产生比 K 壳层 ($1s_{1/2}$) 和 L 壳层 ($2s_{1/2}$, $2p_{1/2}$ 和 $2p_{3/2}$) 更复杂的系统. M 壳层电离的研究为碰撞过程提供了更多的信息, Singh 和 Tribedi^[4] 研究了 20—102 MeV 的 F^+ 与 Au 靶作用

* 国家自然科学基金 (批准号: 11605147, 11505248) 和陕西省教育厅科研计划 (批准号: 14JK1803) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangxiaoran2000@126.com

的 M_α 特征线,将测量截面与ECPSSR (the energy-loss Coulomb deflection perturbed stationary state relativistic)的计算结果做了比较,测量截面比理论值大得多. 本文研究动能为1.0—6.0 MeV的重离子激发Au靶的多电离效应.

2 实验装置和测量方法

实验是在中国科学院近代物理研究所320 kV高电荷态离子综合研究平台1#实验终端上完成的,实验装置示意图参见文献[12]. 离子束由14.5 GHz电子回旋共振离子源提供,束流由不同的电压引出后进入90°的分析磁铁进行电荷态选择. 具有确定电荷态的离子经过加速管加速、四极铁聚焦和限束光阑准直后进入内部具有电磁屏蔽的超高真空(约 10^{-10} Pa)球形靶室,垂直轰击金靶表面中心. 靶的面积约为15 mm × 15 mm,厚度为0.1 mm. 束流到达靶室中心的发散度小于0.7°,靶面上圆形束斑直径约为3 mm.

实验产生的X射线利用AMPTEK公司研制的XR100SDD型硅漂移探测器进行探测. 探测器的铍窗厚度为12.5 μm,有效探测面积为7 mm²,在5.9 keV峰位处的能量分辨可达139 eV (半高全宽/FWHM),当增益设为100时,有效能量测量范围为0.5—14.3 keV. 探测器探头对准靶室中心离靶32.52 mm,并与靶表面成45°夹角,探测立体角为0.0066 sr. 实验前用⁵⁵Fe和²⁴¹Am放射源对探测器进行了刻度. 为避免二次电子发射的影响,联合使用了穿透式法拉第筒和常规法拉第筒对入射离子计数进行了间接的测量.

3 实验结果与讨论

实验中分别选择了不同能量的H⁺离子、Ar⁸⁺离子、Ar¹²⁺离子、Kr¹³⁺离子和Eu²⁰⁺离子,作用于Au靶表面.

3.1 不同离子与Au表面作用产生的特征X射线

图1(a)和图1(b)是在入射离子数目归一化之后,100 keV的H⁺离子和2.4 MeV的Ar¹²⁺离子与Au表面相互作用产生的特征X射线谱的原始图. 图1(a)有能量分别为1.643和2.118 keV的两个峰,图1(b)有能量分别为1.662, 2.150, 2.416和

2.910 keV的四个峰,各峰值的不确定度主要是由X射线的探测器校准误差引起的,通过和劳伦斯伯克利国家实验室[19]提供的数据($N^2P_{3/2} \rightarrow M^2D_{5/2}$ 1.660 keV; $N^2F_{7/2} \rightarrow M^2D_{5/2}$ 2.123 keV; $N^2D_{5/2} \rightarrow M^2P_{3/2}$ 2.408 keV; $N^2D_{3/2} \rightarrow M^2P_{1/2}$ 2.795 keV)对比后可知:图1(a)的两个峰依次为Au的 M_ζ ; M_α 特征X射线,图1(b)的四个峰依次为Au的 M_ζ , M_α , M_γ 和 M_δ 特征X射线,这些线的强度提供了Au的壳层的空穴形成概率以及辐射跃迁或支壳层荧光产额等信息[4]. 同时可以看出,重离子入射时测得的X射线的相对强度比发生了变化. 这是因为质子一般会引起靶原子内壳层的单电离,只产生一个空穴,而高电荷态重离子会引起靶原子内壳层多个电子的电离. 当原子内壳层存在多个空穴时,原子核对剩余电子的束缚能会由于电离电子对原子核的屏蔽作用减弱而发生变化,这样剩余电子就会有“新”的能级分布,对应的原子特征X射线能量和俄歇电子能量也会随之发生变化[20],因此本实验中观察到了重离子入射诱发的靶原子特征X射线谱出现了复杂的伴线结构.

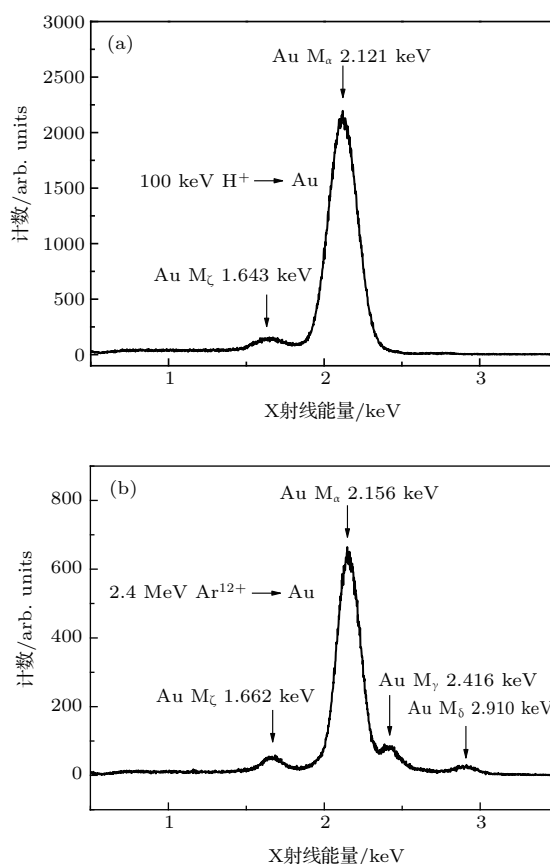


图1 不同离子与Au表面相互作用产生的特征X射线谱 (a) H⁺离子; (b) Ar¹²⁺离子

Fig. 1. Characteristics of X-ray spectra induced by varied ions impacting on Au: (a) H⁺ion; (b) Ar¹²⁺ ion.

3.2 多电离效应与入射离子能量和原子序数的关系

由图 1 可以看出, Au 的 M_{α} 特征 X 射线计数最多, 下面以 M_{α} X 射线为例来讨论 Au 的多电离效应. 图 2(a)—(d) 分别是入射离子数目归一化后, 入射能量为 100, 200, 251, 301 keV 的 H^+ 离子; 1.2, 1.8, 2.4, 3.0 MeV 的 Ar^{12+} 离子; 1.8, 2.4, 3.0, 3.6 MeV 的 Kr^{13+} 离子及 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 MeV 的 Eu^{20+} 离子, 与 Au 表面相互作用产生的 X 射线谱的原始图.

由图 2 可以看出, 对于同一种入射离子, X 射线谱型相同, 随着入射能量的增加, M_{α} X 射线的强度随之增大. 不同离子产生的 M_{α} X 射线的峰值能量及峰值能量位移 (以下简称能移) 如表 1 所列, 相比于 H^+ 离子 (入射能量为 100 keV 和 301 keV 时, M_{α} X 射线峰能量分别为 2121 eV 和 2131 eV, 和理论值 2123 eV 符合得较好, 但当入射能量为其他值时, 射线峰能量比理论值小, 分析认为可能是 X 射

线的探测器校准误差引起的), 其他离子激发的 M_{α} X 射线的峰值能量向高能端移动, 即都有一定的能移, 这是因为重离子与 Au 表面相互作用产生 X 射线的过程中, 引起了靶原子内壳层的多电离, 靶原子内壳层同时存在多个空穴, 导致轨道电子对原子的屏蔽效应减弱, 从而使得原子核对剩余电子的束缚能增加, 对应峰值能量向高能端移动 [1].

其中, Ar^{12+} 的能移为 18—33 eV, Kr^{13+} 的能移为 46—59 eV, Eu^{20+} 的能移为 103—111 eV (除了入射能量为 5.0 和 6.0 MeV 的情况). 这个结果说明了三方面的问题:

1) 由于能移的最大差值为 15 eV, 所以认为在实验的能量范围内, 对于同一种入射离子, X 射线的峰位基本保持不变, 即相同电荷态的离子诱发 Au 靶特征 X 射线的峰值能量几乎不随入射离子能量的变化而变化, 这说明在离子入射能量较低时, 靶原子内壳层的多电离程度受到了入射能量的限制, 电离度近似不变;

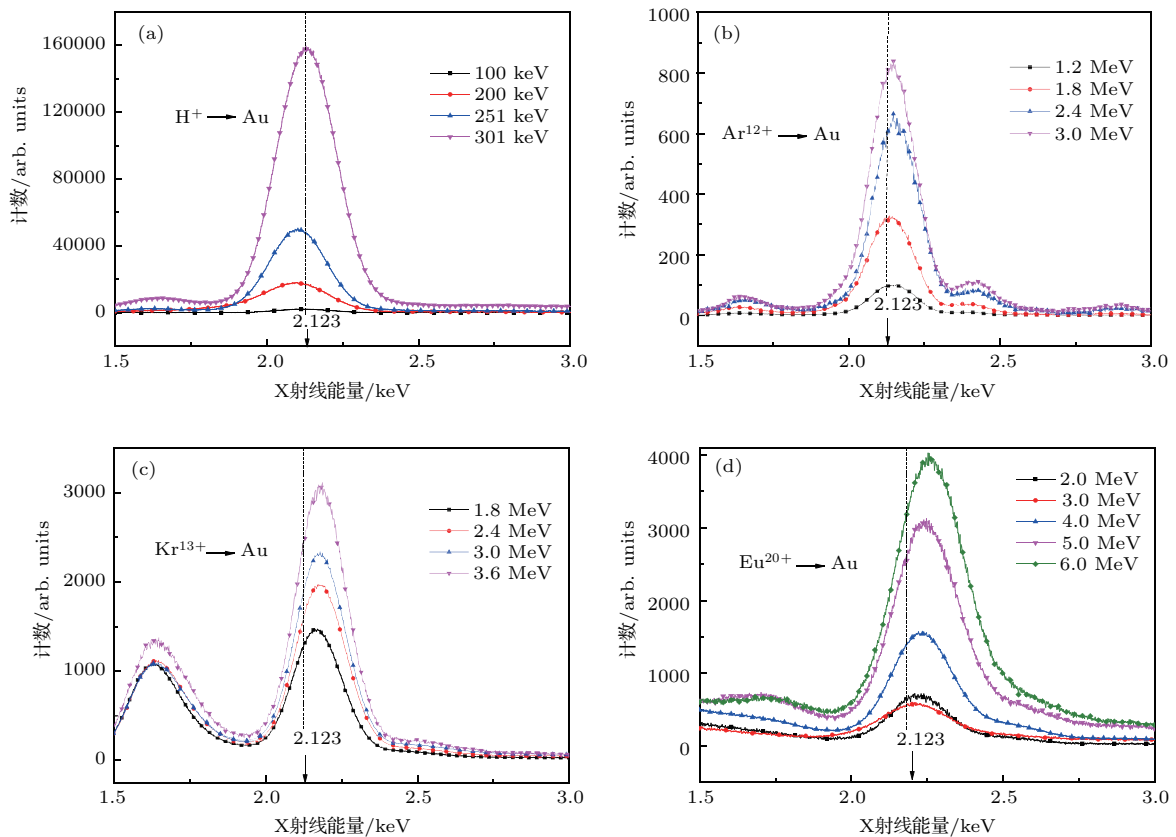


图 2 不同能量的离子与 Au 表面相互作用产生的特征 X 射线谱 (a) H^+ 离子; (b) Ar^{12+} 离子; (c) Kr^{13+} 离子; (d) Eu^{20+} 离子

Fig. 2. Characteristics of X-ray spectra induced by ions with varied kinetic energy impacting on Au: (a) H^+ ion; (b) Ar^{12+} ion; (c) Kr^{13+} ion; (d) Eu^{20+} ion.

2) 对于 Eu^{20+} , 当离子能量为 5.0, 6.0 MeV 时, X 射线的能移分别比 2.0 MeV 时大了 25 eV 和 37 eV, 说明在能量较高时, Eu^{20+} 诱发 Au 靶特征 X 射线的能移随入射离子能量的增加而增加, 即靶原子内壳层的多电离程度取决于入射离子能量;

3) 实验中选择入射离子原子序数 Z_p 分别为 1, 18, 36, 63, 从表 1 可以看出, 随着 Z_p 的增加, M_α 特征 X 射线的能移也随之增加, 即靶原子内壳层的多电离效应随入射离子原子序数的增加而增加.

Singh 和 Tribedi [4] 测量了 36 MeV 的 He^{++} , 28 MeV 的 Li^{3+} , 48 MeV 的 C^{5+} 和 85 MeV 的 F^{7+} 与 Au 靶作用的 M_α 特征线, 其能移分别为 15, 20, 36 和 67 eV, 其 Z_p 分别为 2, 3, 6, 9, 通过与本文实验结果对比可以看出: 在我们的测量结果中, 随着 Z_p 的增加, Au 靶的 M_α 特征线的能移增长得较为缓慢, 而在文献 [4] 的测量结果中, 特征线的能移增长得较快. 这是因为本实验中入射离子的最大能量为 6.0 MeV, 而文献 [4] 中入射离子的能量为 20—102 MeV. 在重离子和靶碰撞过程中, 当 Z_p 增大时, 由于入射离子能量较低, 其在靶原子核的库仑场中的偏转效应很明显, 能够有效穿透至内壳层

表 1 不同离子产生的 M_α X 射线的峰值能量及能移
Table 1. The energy of peak and the shift of energy of M_α X-rays induced by different ions impact.

离子	入射能量/MeV	峰值能量 E_{M_α}/eV	能移 $\Delta E_{M_\alpha}/\text{eV}$
H^+	0.100	2121	-2
	0.200	2097	-26
	0.251	2103	-20
	0.301	2131	8
Ar^{12+}	1.2	2147	24
	1.8	2141	18
	2.4	2156	33
	3.0	2147	24
Kr^{13+}	1.8	2169	46
	2.4	2181	58
	3.0	2180	57
	3.6	2182	59
Eu^{20+}	2.0	2226	103
	3.0	2234	111
	4.0	2233	110
	5.0	2251	128
	6.0	2266	140

与电子相互作用的概率较低, 从而影响到靶原子内壳层的多电离程度, 本文能移的实验结果也验证了这种效应的影响. 这个比较结果也说明了靶原子内壳层的多电离程度取决于入射离子的能量和原子序数.

3.3 多电离效应与入射离子电荷态的关系

图 3 是入射离子数目归一化后, 入射能量为 1.2, 1.8 MeV 的 Ar^{8+} 离子与 Au 表面相互作用产生的 X 射线谱的原始图. 相应的峰值能量分别为 2135 和 2138 eV, 能移分别为 13 和 15 eV, 和表 1 中能量为 1.2, 1.8 MeV 的 Ar^{12+} 的能移 (24 和 18 eV) 比较可知, Ar^{12+} 比 Ar^{8+} 的能移要大一些, 这说明多电离的程度与离子的电荷态有关, 即主要与离子的外壳的空穴数量有关, Ar^{12+} 的电子组态为 $1s^2 2s^2 2p^2$, 外壳层有四个空穴, 而 Ar^{8+} 的电子组态为 $1s^2 2s^2 2p^6$, 外壳层没有空穴.

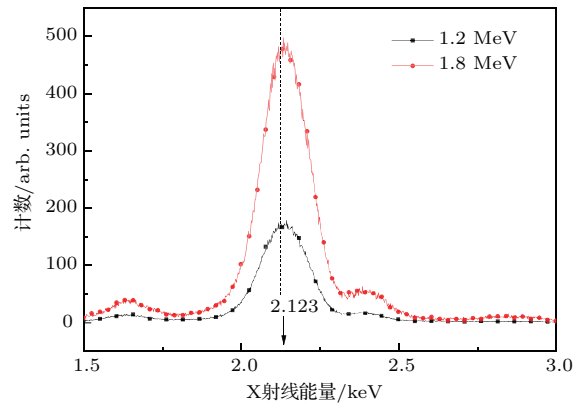


图 3 入射能量不同的 Ar^{8+} 离子与 Au 表面作用产生的特征 X 射线谱

Fig. 3. Characteristics of X-ray spectra induced by Ar^{8+} ions with varied kinetic energy impacting on Au.

3.4 产额比与入射离子原子序数的关系

在本文实验的能量范围内, 选择了单核子能量接近的 1.8 MeV 的 Ar^{12+} , 3.0 MeV 的 Kr^{13+} 和 6.0 MeV 的 Eu^{20+} 离子, 相应的单核子能量分别为 45.0, 35.7 和 39.5 keV/u. 利用 Origin 软件对实验测得的 X 射线谱进行了高斯拟合, 得到了 M_ζ , M_α , M_γ 和 M_δ 特征 X 射线的峰面积, 考虑到离子在 Au 靶中的最大穿透深度远小于靶的厚度和探测器定标后的道宽为 0.00175 keV, 可以给出 M_α 和 M_γ 的单离子 X 射线的相对产额为

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

表2 不同离子产生的 M_α 和 M_γ 的 X 射线的相对产额及产额比
Table 2. Relative yield and yield ratio of M_α and M_γ X-ray produced by different ions.

离子	单核子能量/keV·u ⁻¹	M_α 相对产额 Y_α	M_γ 相对产额 Y_γ	产额比 Y_γ/Y_α
Ar ¹²⁺	45.0	$1.742 \pm 0.105 (10^{-5})$	$1.129 \pm 0.105 (10^{-6})$	0.122
Kr ¹³⁺	35.7	$1.575 \pm 0.094 (10^{-4})$	$1.433 \pm 0.086 (10^{-5})$	0.091
Eu ²⁰⁺	39.5	$3.139 \pm 0.188 (10^{-4})$	$1.225 \pm 0.074 (10^{-4})$	0.390

其中, C 为 X 射线总计数, N 为总离子数, A 为峰面积, Q 为电量值, q 为入射离子的电荷态, e 为电子电量, Ω 为探测器的立体角 (本次实验为 0.0066 sr), η 为探测器的探测效率 (当 X 射线能量分别为 2.23 和 2.42 keV 时, η 依次为 0.725, 0.753). 不同离子产生的 M_α 和 M_γ 的单离子 X 射线的相对产额及产额比如表 2 所列. 产额的误差主要来源于 X 射线的计数统计误差 (5%), 入射离子计数误差 (3%) 及拟合时由于伴线位置的不确定度所引起的误差 (2%), 所以产额的最大不确定度为 6%.

从表 2 可以看出, 产额比 Y_γ/Y_α 基本上随 Z_p 的增加而增加, 但对于 Kr, Y_γ/Y_α 反而减小, 这是因为 Kr 与 Au 相互作用过程中, 产生了较强的 Kr 的 L_α 特征 X 射线 (如图 2 (c), 峰位能量为 1.643 keV 左右, 峰计数在 1072—1342 之间). 下面解释产额比 Y_γ/Y_α 与入射离子原子序数的关系.

当 Au 原子的 M 壳层有一个空穴时, 空穴退激的方式有四种情况: 产生俄歇电子的概率即俄歇产额为 a_i , 产生 X 射线的概率即荧光产额为 ω_i , 产生 CK 跃迁的概率为 f_i , 产生超级 CK 跃迁的概率为 S_i , 它们之间的关系为

$$a_i + \omega_i + f_i + S_i = 1. \quad (2)$$

四种方式中, 只有 X 射线发射过程属于辐射跃迁, 其余均为无辐射跃迁. 另外, 当 $Z \leq 36$ 时, M 壳层空穴退激才有可能发生超级 CK 跃迁, 所以在本文中 (2) 式的 S_i 实际对应的是产生 CK 跃迁的概率.

如前所述, 重离子与 Au 表面相互作用过程中, 引起了靶原子内壳层的多电离. 和单电离相比, 内壳层的空穴数目增多, 电子数目减少, 支壳层电子通过无辐射跃迁的概率就会降低. 相应地, 通过辐射跃迁发射 X 射线的概率 (荧光产额为 ω_i) 会随之增加. 但 ω_3 比 ω_5 (M_γ 对应 N_5 到 M_3 的跃迁, M_α 对应 N_7 到 M_5 的跃迁) 增加得要快, 而且产额比 Y_γ/Y_α 只与碰撞作用后的靶原子参数 (包括荧光产额、CK 跃迁概率等) 有关, 所以, 当 Z_p 增大时, 靶

原子内壳层的多电离程度增强, 产额比 Y_γ/Y_α 随之增加.

4 结 论

本文观测和分析了不同能量的 H^+ , Ar^{8+} , Ar^{12+} , Kr^{13+} 和 Eu^{20+} 离子与 Au 表面产生的特征 X 射线谱及其能移, 实验结果表明, H^+ 激发了 Au 的 M_ζ , M_α X 射线, 而 Ar^{8+} , Ar^{12+} , Kr^{13+} 和 Eu^{20+} 激发了 Au 的 M_ζ , M_α , M_γ 和 M_δ X 射线, 这是因为重离子引起了靶原子内壳层的多电离, 使得重离子入射时测得的 X 射线的相对强度比发生了变化. 多电离效应使 X 射线有不同程度的能移, 在离子入射能量较低时, 靶原子内壳层的多电离程度几乎与入射能量无关; 而离子能量较高时, 多电离程度随入射离子能量的增加而增加, 并和 Singh 和 Tribedi^[4] 的研究结果做了比较. 同时, 多电离程度也取决于离子的外壳层空穴数量和其原子序数, 产额比 Y_γ/Y_α 基本上随入射离子原子序数的增大而增大, 进一步说明了多电离程度随入射离子原子序数的增大而增强.

由能移和谱线展宽可以确定原子内壳层的多电离电子组态, 这些测量结果为进一步研究原子内壳层的多电离机制提供了基础数据, 但由于受探测器分辨率 (139 eV) 的限制, 没有测得准确的谱线展宽数据, 有待于以后选用更高分辨率的探测设备来进一步研究原子内壳层多电离现象.

衷心感谢兰州重离子加速器国家实验室 320 kV 高电荷态离子综合研究平台的老师在实验上提供的帮助和讨论.

参考文献

- [1] Czarnota M, Bana D, Braziewicz J, Semaniak J, Pajek M, Jaskola M, Korman A, Trautmann D, Kretschmer W, Lapicki G, Mukoyama T 2009 *Phys. Rev. A* **79** 032710
- [2] Zhang X A, Zhao Y T, Hoffmann D H H, Yang Z H, Chen X M, Xu Z F, Li F L, Xiao G Q 2011 *Laser Part. Beams* **29** 265

- [3] Zhao Y T, Xiao G Q, Zhang X A, Yang Z H, Zhan W L, Chen X M, Li F L 2006 *Nucl. Instrum. Meth. B* **245** 72
- [4] Singh Y, Tribedi L C 2002 *Phys. Rev. A* **66** 062709
- [5] Chen X M, Jiang L J, Zhou P, Zhou C L, Gao Z M, Qiu X Y, Cui Y, Wang X A, Lou F J, Lü X Y, Jia J J, Chen L, Shao J X, Lü Y, Wang F 2011 *Chin. Phys. B* **20** 013402
- [6] Wang X, Zhao Y, 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 *Phys. Lett. A* **376** 1197
- [7] Ghanbari-Adivi E, Eskandari S 2015 *Chin. Phys. B* **24** 013401
- [8] 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
- [9] Hoffmann D H H, Blazevec A, Korostiy S, Ni P, Pikuz S A, Rethfeld B, Rosmej O, Roth M, Tahir N A, Udrea S, Varentsov D, Weyrich K, Sharkov B Y, Maron Y 2007 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sec. A* **577** 8
- [10] Yang Z R, Yuan P, Li Z W, Yang Z H 2012 *High Power Laser and Particle Beams* **24** 1896 (in Chinese) [杨兆锐, 袁萍, 李忠文, 杨治虎 2012 强激光与粒子束 **24** 1896]
- [11] Sharkov B 2001 *Plasma Phys. Control. Fusion* **43** A229
- [12] 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
- [13] Zhang X A, Xiao G Q, Zhao Y T, Yang Z H, Chen X M, Li F L 2012 *Sci. China G* **42** 42 (in Chinese) [张安, 肖国青, 赵永涛, 杨治虎, 陈熙萌, 李福利 2012 中国科学 G 辑 **42** 42]
- [14] Liang C H, Zhang X A 2007 *J. Nw. Univ. (Nat. Sci.)* **37** 547 (in Chinese) [梁昌慧, 张小安 2007 西北大学学报 (自然科学版), **37** 1547]
- [15] Zhu Z Y, Zhu Z H, Jiang G, Cheng X L 2002 *J. Atom. Mole. Phys.* **19** 138 (in Chinese) [朱志艳, 朱正和, 蒋钢, 程新路 2002 原子与分子物理学报 **19** 138]
- [16] 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]
- [17] Liang C H, Zhang X A, Li Y Z, Zhao Y T, Xiao G Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 163201 (in Chinese) [梁昌慧, 张小安, 李耀宗, 赵永涛, 肖国青 2014 物理学报 **63** 163201]
- [18] Zhou X M, Zhao Y T, Cheng R, Wang X, Lei Y, Sun Y B, Wang Y Y, Xu G, Ren J R, Zhang X A, Liang C H, Li Y Z, Mei C X, Xiao G Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 083201 (in Chinese) [周贤明, 赵永涛, 程锐, 王兴, 雷瑜, 孙渊博, 王瑜玉, 徐戈, 任洁茹, 张小安, 梁昌慧, 李耀宗, 梅策香, 肖国青 2013 物理学报 **62** 083201]
- [19] X-RAY DATA BOOKLET, Center for X-ray Optics and Advanced Light Source, Lawrence Berkeley National Laboratory [EB/OL] <http://xdb.lbl.gov/> [2018-06-15]
- [20] Wang X 2013 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an Jiaotong University) (in Chinese) [王兴 2013 博士学位论文 (西安: 西安交通大学)]

Multiple ionization effect of Au induced by different ions*

Liang Chang-Hui¹⁾ Zhang Xiao-An^{1)3)†} Li Yao-Zong¹⁾ Zhao Yong-Tao²⁾³⁾
 Zhou Xian-Ming³⁾ Wang Xing²⁾ Mei Ce-Xiang¹⁾ Xiao Guo-Qing³⁾

1) (*Ion Beam and Optical Physical Joint Laboratory of Xianyang Normal University and Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Xianyang 712000, China*)

2) (*School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

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

(Received 3 September 2018; revised manuscript received 5 November 2018)

Abstract

We report the experimental data of characteristic X-ray spectra produced by the impact of H^+ , Ar^{8+} , Ar^{12+} , Kr^{13+} and Eu^{20+} ions with different kinetic energies on Au surface in the National Laboratory of Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, China. The energy shifts of X-ray spectra are analyzed and the ratio of X-ray yield is calculated. The results show that H^+ can excite the characteristic X-ray spectra of M_{ζ} and M_{α} of Au, while Ar^{8+} , Ar^{12+} , Kr^{13+} and Eu^{20+} can excite the characteristic X-ray spectra of M_{ζ} , M_{α} , M_{γ} and M_{δ} of Au, because the inner shells of target atom are multiply ionized by heavy ions impact, so that the relative intensity ratio of the X-rays changes when the heavy ions are incident. There are different energy shifts of Au M X-ray due to multiple ionization effect in collision. When the ion incident energy is lower, the degree of multiple ionization of the inner shells of the target atom is almost independent of the incident energy, when the ion energy is higher, the degree of multiple ionization increases with incident ion energy increasing. At the same time, the degree of multiple ionization also depends on the number of holes in the outer shell of the ion and its atomic number. That the ratio of X-ray yield increases with the increase of the atomic number of the incident ion further indicates that the degree of multiple ionization increases with atomic number of the incident ion increasing. The multiple ionization and electron configuration of the inner shells of the atom can be determined by the energy shift and spectra broadening. These measurements provide basic data for further studying the multiple ionization mechanism of the inner shells of the atom. But due to the limitation of the resolution of the detector, the spectral broadening data cannot be measured. It is necessary to use a higher-resolution detector to further study the multi-ionization effect of the inner shells of the atom.

Keywords: heavy ions, X-ray, energy shift, multiple ionization effect

PACS: 32.30.Rj, 34.50.Fa, 34.80.Dp, 79.20.Rf

DOI: 10.7498/aps.67.20181642

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11605147, 11505248) and the Scientific Research Program of Education Bureau of Shaanxi Province, China (Grant No. 14JK1803).

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