

高电荷态 Ar^{17+} 离子在表面以下过程中发射 X 射线 分支比及各分支能量的研究^{*}

邹贤容 邵剑雄 陈熙萌[†] 崔 莹

(兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

(2009 年 9 月 10 日收到; 2009 年 12 月 3 日收到修改稿)

对低速高电荷态 Ar^{17+} 离子在与不同金属靶相互作用过程中放出的 Ar 离子 K 壳 X 射线的 $K\beta/K\alpha$ 分支比及各分支 K 线平均能量进行了理论研究. 在文献 [28, 29] 的基础上, 通过对实验数据的分析, 得到了 0.3—0.8 玻尔速度之间的 Ar^{17+} 离子与 Be, Al, Ni, Mo, Au 等金属相互作用过程中入射离子发出的 X 射线分支比及各分支平均能量. 理论上, 基于导带电子俘获模型和级联跃迁模型, 建立耦合方程组, 以解释实验主要结果, 理论结果与实验符合较好. 在此基础上讨论了低速高电荷态 Ar^{17+} 离子在金属表面以下的空心原子形成及退激发过程中发射 K 壳 X 射线的物理图像.

关键词: 高电荷态, X 射线, 级联退激发, 射线分支比

PACC: 3450D, 3220R, 3270J

1. 引 言

低速高电荷态离子 (slow highly charged ions, SHCI) 与固体表面相互作用的研究是目前国际上原子分子领域的研究热点之一^[1-4], SHCI 可以产生很强的库仑势场, 例如 $\text{U}^{91+} 1s$ 态的库仑场强比氢原子 $1s$ 态的库仑场强高 6 个量级, 为 $2 \times 10^{16} \text{ V/cm}$, 这是目前任何外场无法达到的. 因此, 一般认为, 在处理低速高电荷态离子与表面相互作用问题时, 势能影响远大于动能. 基本上, 所有的问题都是在准静态强扰动的框架内在进行讨论.

高电荷态离子与固体表面相互作用的基本过程大致可分为四个阶段: 镜像加速过程、空心原子形成过程、空心原子衰变过程和势能沉积过程. 目前, 国际上在这一领域的工作已经开展得很广泛了, 实验研究主要集中在以下几个方面: 离子在固体中电荷平衡时间^[5-8]、离子能量损失与电荷态的关系^[9-15]、作用过程中各种相关电子的发射^[16-21]、作用过程中 X 射线及可见光的发射^[22-33] 以及表面原子的溅射和材料表面改性等^[34-36]. 以上研究获得

了很多关于表面以上高里德伯态空心原子形成和退激发以及离子在表面以下势能沉积的物理信息.

作为描述高电荷态离子在金属表面一下空心原子形成及衰变过程的一个重要研究手段, 测量离子在表面以下发射 X 射线谱是十分必要的, 因为 X 射线谱中各伴线的分支比以及平均能量是与离子在表面以下电荷中和与退激发过程密切相关的. 所以在本工作中, 对低速高电荷态 Ar^{17+} 离子在与不同金属靶相互作用过程中放出的 Ar 离子 K 壳 X 射线进行了理论研究. 在前期实验工作的基础上, 我们得到 0.3—0.8 之间的 Ar^{17+} 离子与 Be, Al, Ni, Mo, Au 等金属表面相互作用过程中入射离子发出的 X 射线谱; 对两个关键物理量进行了分析, 即 $K\beta/K\alpha$ 分支比和各分支的射线平均能量, 发现这两个量基本上和靶的种类、离子速度无关. 同时, 在导带电子俘获模型和级联跃迁模型的基础上, 进行理论计算, 从理论上得到 $K\beta/K\alpha$ 分支比和各分支的射线平均能量的信息, 理论计算结果和实验结果很好地符合. 我们初步认为 Ar^{17+} 离子 K 线的发射的物理图像是在离子进入表面时, 大量金属导带电子被俘获到离子外壳层, 形成表面以下的空心原子. 随着离

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 10804039, 10574132) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: chenxm@lzu.edu.cn

子的运动,空心原子将会衰变退激发,外壳电子将集体通过级联退激发的形式至内壳,伴随有内壳层 X 射线发射.各伴线分支比和平均能量与空心原子形成过程及集体退激过程直接相关.

2. 理论模型

本文所引用的实验数据来自文献[28,29],具体的实验步骤和方法可以参考文献[28—30].本文在文献[28,29]的基础上,对其实验数据进行分析拟合,提取有关物理信息,同时加以理论解释.

本工作对文献[28,29]中的数据进行四峰拟合,理由如下: Briand^[37] 小组从实验上测量了 340 keV Ar^{17+} 离子轰击 Ag 靶的 Ar 离子 X 射线谱,并指出 Ar^{17+} 的 K 壳 X 射线是由 $K\alpha, K\beta, K\gamma, K\eta$ 各支壳层的伴线构成,所以应当采取四高斯峰拟和,合理的提取各伴线信息.

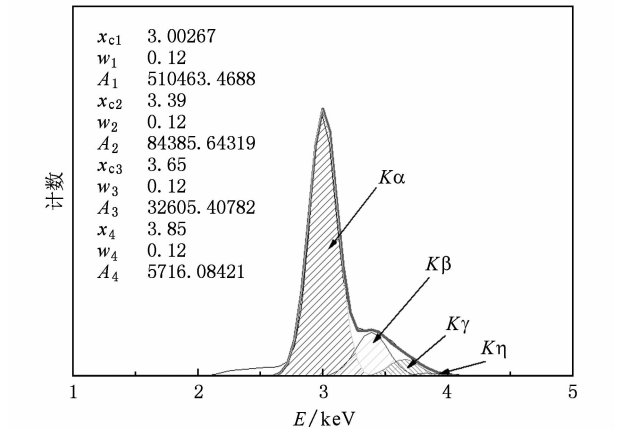


图 1 实验谱图的四峰拟合谱

从图 1 中可以看出,拟合曲线很好的与实验数据符合起来.把所有的实验谱图进行上述的拟和后,可以得到下面的结果(图 2—图 4).

Ar^{17+} 离子在表面以上俘获靶电子的临界距离大约为 30a. u.,对于 45°入射的情况,离子在表面以上飞行的时间为 10^{-15} s;远小于高里德伯态 Ar 离子外壳电子退激发的特征时间^[25]. 所以在本实验中,离子在表面以上俘获的大量电子没有足够时间退激发到内壳层,这些电子将在离子进入表面时被再次剥离^[25]. 只有在表面以下发生的电荷平衡过程中俘获的电子对 K 壳 X 射线有重要影响.

Huang^[12] 和 Winecki^[38] 在研究高电荷态离子掠射金属表面的出射电荷态分布时指出,当高电荷态

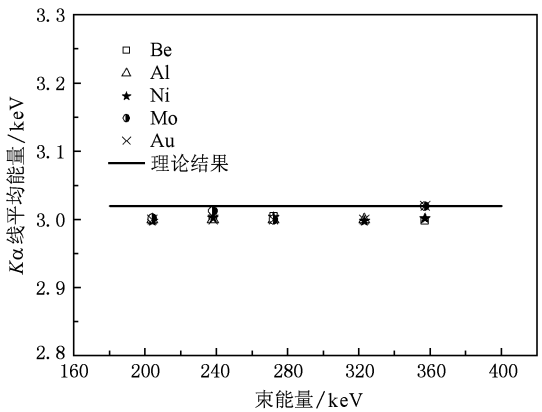


图 2 Ar^{17+} 离子 $K\alpha$ 线平均能量(点是实验值^[28,29],直线是理论结果)

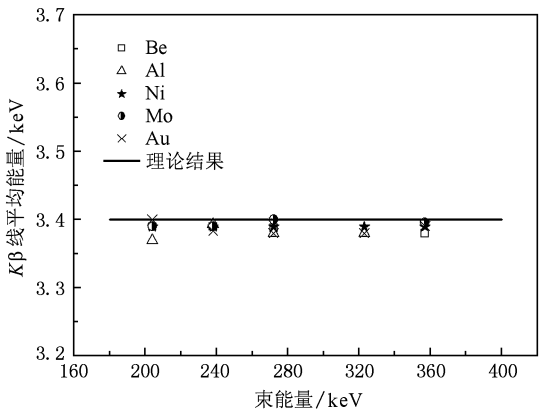


图 3 Ar^{17+} 离子 $K\beta$ 线平均能量(点是实验值^[28,29],直线是理论结果)

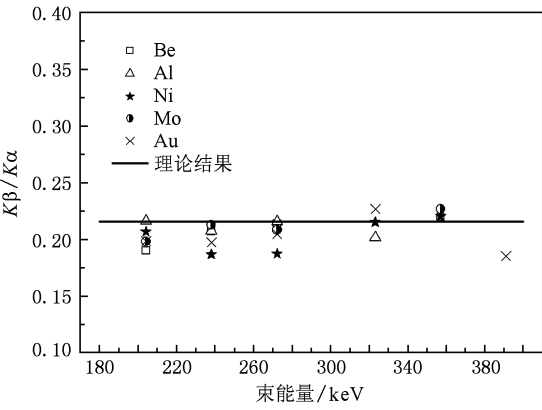


图 4 Ar^{17+} 离子的 $K\beta/K\alpha$ 分支比(点是实验值^[28,29],直线是理论结果)

离子离子撞击到金属表面原子层时,将通过共振的方式俘获大量金属导带电子到 Ar 离子的 M 壳层.

同时,根据 Burgdörfer^[39] 关于屏蔽距离和轨道半径匹配的的理论研究.也可以估算出金属导带电子将被俘获到 Ar^{17+} 离子 M 和 N 壳层,形成表面以下中空原子.同时由于电子云屏蔽的作用,这些离子外壳能级的能量将会提升至约 10 eV,基本和导带电子能级相当.同时由于 Auger 退激过程的跃迁速率 $\Gamma_{MNN} \approx 10\Gamma_{LNN} \approx 50 \cdot \Gamma_{KNN}$ ^[12],所以从 $N \rightarrow M$ 的退激发速率将远远大于其向 L, K 壳退激发的速率.所以在很好的近似下,我们认为大量导带电子俘获到离子 N 壳然后迅速占满了 M 壳.所以基于上述讨论,在本工作的理论计算中,我们初步认为高电荷态 Ar 离子接触到金属表面原子层时将迅速共振俘获大量导带电子至其 M 壳层,形成表面以下中空原子.有理由相信这样的近似与实际过程差异将会很小.

我们将建立 Ar 离子 K, L, M 壳之间的电子布居数随时间演化的耦合微分方程组,通过计算在离子运动过程中各种跃迁速率随着时间的演化和积累效应,我们将得到低速 Ar^{17+} 离子在金属表面以下发出的 K 壳层 X 射线的分支比和各分支射线平均能量等重要信息,这些信息将反映 SHCI 在表面以下电荷俘获和演化的动力学机理.本工作中有关 M, L, K 壳之间电子布居数随时间演化的耦合微分方程组如下:

$$\begin{aligned} n_M &= 8, \\ \frac{dn_L}{dt} &= \Gamma_{LMM} + \Gamma_{L\alpha} - 2\Gamma_{KLL} - \Gamma_{KLM} - \Gamma_{K\alpha}, \quad (1) \\ \frac{dn_K}{dt} &= \Gamma_{KLL} + \Gamma_{KLM} + \Gamma_{KMM} + \Gamma_{K\alpha} + \Gamma_{K\beta}, \end{aligned}$$

其中,各种跃迁速率可以根据原子组态计算得到

$$LMM \text{ 俄歇电子跃迁速率 } \Gamma_{LMM} = 9.56 \times 10^{-5} (8 - n_L) n_M (n_M - 1) \quad [42, 41, 42];$$

$$KLL \text{ 俄歇电子速率 } \Gamma_{KLL} = 3.18 \times 10^{-4} (2 - n_K) n_L (n_L - 1) \quad [42, 43, 44];$$

$$KLM \text{ 俄歇电子速率 } \Gamma_{KLM} = 4.97 \times 10^{-5} (2 - n_K) n_L n_M \quad [42, 44];$$

$$K\alpha \text{ 速率 } \Gamma_{K\alpha} = 3.04 \times 10^{-4} (2 - n_K) n_L \quad [45, 46];$$

$$K\beta \text{ 速率 } \Gamma_{K\beta} = 2.49 \times 10^{-5} (2 - n_K) n_M \quad [45, 46].$$

以上方程组计算的初始条件为 $n_M = 8, n_L = 0, n_K = 1$, 对应与 Ar^{17+} 离子与金属表面原子层碰撞时导带电子快速俘获至 M 壳层的情况.

伴随着离子在金属表面以下的穿行,电子布居

数随时发生变化.同时对于任意时刻的布居数而言,发出 X 射线的概率与其密切相关,基本正比于布居数.所以,对整个飞行时间积分,就可以得到在离子在表面以下的过程中,发出的 $K\alpha, K\beta$ X 射线总数目是

$$N_{K\alpha} = \int \Gamma_{K\alpha} dt,$$

$$N_{K\beta} = \int \Gamma_{K\beta} dt,$$

那么 $K\beta, K\alpha$ X 射线分支比就等于 $R = \frac{N_{K\alpha}}{N_{K\beta}}$.

Bhalla^[46] 的研究表明,不同电子布居状态对应的 $K\alpha, K\beta$ X 射线能量将由于电子组态之间的相互作用不同而有所差异.在很好的近似下,对应于不同的 K, L, M 壳层电子布居状态下发射的 X 射线能量有^[12, 46]

$$E_{K\alpha} = 3144.3 - 22.2n_L - 4.9n_M + 0.4n_L n_M, \quad (2)$$

$$E_{K\beta} = 3702.4 - 60.7n_L - 15.9n_M + 1.5n_L n_M. \quad (3)$$

所以在整个过程中,我们观测到的 $K\alpha, K\beta$ 伴线的平均能量应当为

$$\begin{aligned} \overline{E_{K\alpha}} &= \frac{1}{\omega_\alpha} \int E_{K\alpha} \Gamma_{K\alpha} dt, \\ \overline{E_{K\beta}} &= \frac{1}{\omega_\beta} \int E_{K\beta} \Gamma_{K\beta} dt. \end{aligned} \quad (4)$$

3. 比较与讨论

为了更清晰的从图像上理解 Ar^{17+} 离子在金属表面以下空心原子形成和级联退激发过程.我们在图 5 中给出 Ar 离子内壳层电子布居数 n_M, n_L, n_K 随着时间演化的情况.图中纵坐标是各个壳层电子布居数,横坐标是从时间,时间零点是离子撞击到表面原子层的瞬间.

从图 5 中可以看出,当 Ar^{17+} 离子进入金属表面以下时,其 M 壳层被金属导带电子迅速屏蔽并填充,形成空心原子.随着离子在金属中的穿行, L 壳层和 K 壳层将会通过 Auger 过程和辐射退激的形式被逐步填充.伴随着这种退激发过程,离子各壳层电子布居数随着时间演化.根据(2)和(3)式,可以预见离子在表面以下穿行的过程中每一时刻所发射的 X 射线的能量也会随着时间变化.离子发射 X 射线能量随着时间的演化在图 6 中给出.

从图 6 中可以看出,当离子刚进入金属表面时,由于其 L 壳层还未被填充,缺少电子间的屏蔽使得

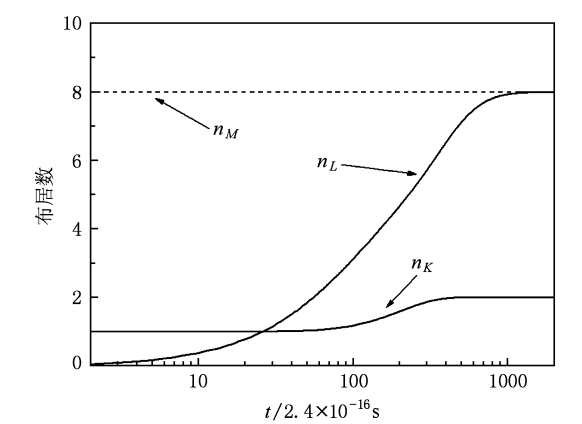


图 5 Ar^{17+} 离子在金属表面以下各壳层电子布居数随着时间的演化

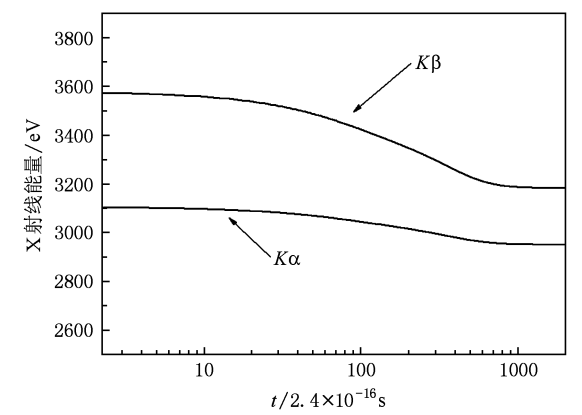


图 6 Ar^{17+} 离子在金属表面以下所发射的 $K\alpha$ 与 $K\beta$ X 射线能量随着时间的演化

离子各能级间的能量差增加,所以此时发射 X 射线能量最大,对于 $K\beta$ 和 $K\alpha$ 分别为大约 3580 和 3100 eV. 随着电子从 M 壳集体退激发至 L 和 K 壳,内壳各能级间电子相互作用和屏蔽增强,X 射线能量将有所下降. 直至 L 和 K 壳基本填满时,X 射线能量对于 $K\beta$ 和 $K\alpha$ 分别为大约 3190 和 2950 eV,该值和 X 射线表^[47]中 K 壳单电离的 Ar^+ 离子 X 射线能量值一致. 总体来说,由于在表面以下穿行过程中,离子各壳层电子之间的相互作用和屏蔽是逐步建立的,所以高电荷态 Ar^{17+} 离子发射的 X 射线的平均值将要大于 K 壳单电离 Ar^+ 离子的值. 对于 Ar^{17+} 离子,各支壳层 X 射线平均能量有

理论结果为 $\overline{E_{K\alpha}}(\text{th.}) = 3020 \text{ eV}, \overline{E_{K\beta}}(\text{th.}) = 3400 \text{ eV};$

实验结果为 $\overline{E_{K\alpha}}(\text{ex.}) = 3000 \text{ eV}, \overline{E_{K\beta}}(\text{ex.}) = 3390 \text{ eV}.$

可以看出,理论值与实验结果符合得较好. 通过以上的讨论我们得到,在本实验中观测到的各支壳层 X 射线能量值直接的对应着高电荷态 Ar^{17+} 离子在表面以下的中空原子形成和退激发过程的,这 和 低 电 荷 态 的 值 有 很 大 差 异.

在本理论工作中,我们得到的 $K\beta/K\alpha$ 分支比为 0. 216. 在实验上我们观测到对于不同靶和不同能量的离子入射, $K\beta/K\alpha$ 分支比在 0. 18—0. 22 之间,可以说理论与实验符合得较好. 为了更好的理解高电荷态 Ar^{17+} 离子分支比,我们在图 7 中给出了跃迁速率 $\Gamma_{K\alpha}$ 和 $\Gamma_{K\beta}$ 随着时间演化的情况. 从图 7 中可以看出, $\Gamma_{K\beta}$ 开始基本不随时间变化,但很快将随着时间下降. $\Gamma_{K\alpha}$ 随着时间上升达到最大值之后迅速随着时间下降. 这两点是和 M 壳空心原子的形成和退激发密切相关的. 在离子进入金属表面时,离子 M 壳层被迅速填充,布居数基本维持在 8,所以 $\Gamma_{K\beta}$ 就只取决于 K 壳空穴的数目,由于 K 壳被缓慢填充,所以 $\Gamma_{K\beta}$ 也将随着时间下降. $\Gamma_{K\alpha}$ 则取决于 L 壳层电子数量和 K 壳空穴数量的乘积. 前者随着 M 壳的退激发渐渐增加,后者则随着时间减少,两者之间的竞争就造成 $\Gamma_{K\alpha}$ 会有一最大值.

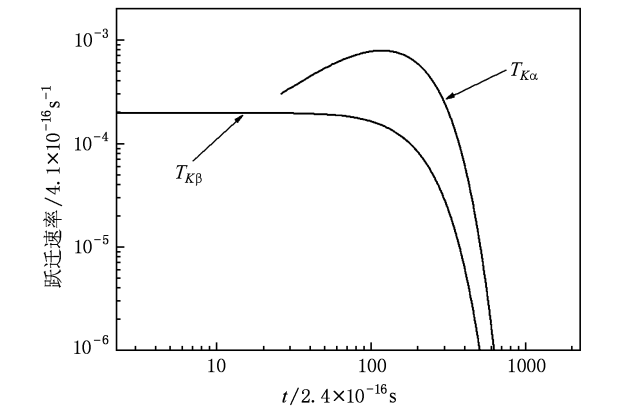


图 7 Ar^{17+} 离子在金属表面以下 $K\alpha$ 与 $K\beta$ 的跃迁速率随着时间的演化

通过图 7,我们也可以估算出 Ar^{17+} 离子 X 射线 $K\beta/K\alpha$ 分支比的值. 可以看出 $\Gamma_{K\beta}$ 的最大值在 2×10^{-4} , $\Gamma_{K\alpha}$ 的最大值在 10^{-3} ,由于各分支 X 射线数量就是跃迁速率曲线下的面积,所以可以大致估算出分支比就约等于 0. 2. 同样,这样的分支比直接对应与 Ar^{17+} 离子在表面以下空心原子形成退激发过程. 图 8 给出了 K 壳层单电离的 Ar^+ 离子 $\Gamma_{K\beta}$ 和 $\Gamma_{K\alpha}$ 随着时间演化的曲线. 通过对图 7 和 8 的比较,可以发现高电荷态离子在金属表面一下退激发过程中发

射 X 射线的过程和低电荷态下有很大不同. 在图 8 中, 我们同样可以估算出低电荷态 Ar^+ 离子的 $K\beta/K\alpha$ 分支比约为 0.08. 在我们的理论计算中, 此分支比等于 0.07, 与 X 射线能量表中 Ar^+ 离子的实验值^[47]一致.

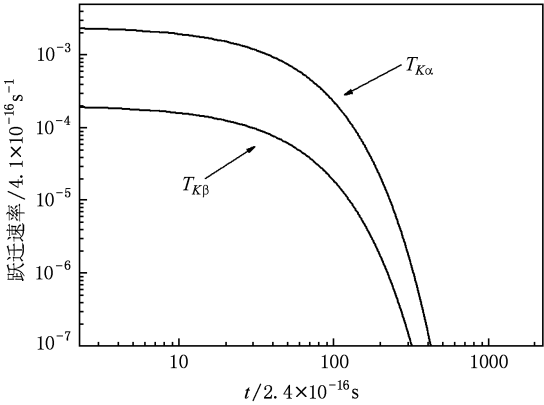


图 8 K 壳层单电离 Ar^+ 离子在金属表面以下 $K\alpha$ 与 $K\beta$ 跃迁速率随着时间的演化

为了直观的描述低速 Ar^{17+} 离子在金属表面以下发射 K 壳 X 射线的能量分布, 在图 9 中给出了在理论上模拟的 Ar^{17+} 离子发射 X 射线的原始谱图, 该谱只考虑由于物理过程导致的离子发射不同能量 X 射线的分布, 并未考虑电子学展宽和探测器分辨的影响. 从图中可以看出, $K\alpha$ 射线的平均能量在 3020 eV, 由于电子组态相互作用不同造成的物理展宽在 30 eV 左右; $K\beta$ 射线的平均能量在 3400 eV, 物理展宽约为 80 eV. 由于本工作中理论对实验描述较好, 我们有理由相信对 Ar^{17+} 离子在金属表面以下发射 K 壳 X 射线谱的模拟也应当和实际的物理过程比较接近; 即基于导带电子俘获和级联退激发模型的模拟结果对重现 Ar^{17+} 离子在表面以下发射 X 射线的原始谱图是有较大帮助的.

为了更直接的比较模拟和实验的结果, 我们在计及了探测器分辨和电子学展宽 (120 eV) 的影响下, 基于原始发射谱模拟结果图 9, 就得到了对实际观测 X 射线谱的模拟谱图 10. 通过对比模拟谱图 10 和文献[28, 29]中的实验观测谱图, 我们发现模拟谱基本给出了实验谱的特征, 即各伴线的展宽、峰高和平均能量, 理论实验符合较好. 通过图 9 和图 10, 我们在一定程度上理解了 Ar^{17+} 离子 X 射线实验观测谱的形成和所对应的物理机理, 即表面以下空心原子退激发所发射的原始 X 射线谱被探测器和电子学展宽的结果.

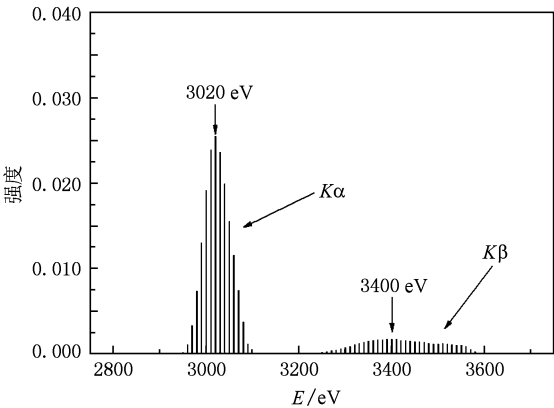


图 9 Ar^{17+} 离子在金属表面以下 X 射线发射谱的模拟

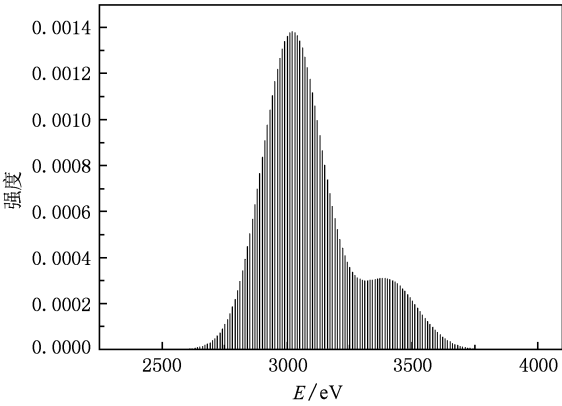


图 10 Ar^{17+} 离子在金属表面以下 X 射线观测谱的模拟

4. 总 结

本工作对低速高电荷态 Ar^{17+} 离子在与不同金属靶相互作用过程中放出的 Ar 离子 K 壳 X 射线进行了研究. 基于导带电子俘获模型和级联跃迁模型, 从理论上得到 $K\beta/K\alpha$ 分支比和各分支射线平均能量, 理论计算结果和实验结果很好的符合. 我们初步认为 Ar^{17+} 离子 KX 射线的发射的物理图像是: 当 Ar^{17+} 离子撞击到金属表面时, 大量金属导带电子将对离子产生屏蔽, 并且通过能级匹配, 以很快的速率俘获到离子的 M 壳层. 这大量的 M 壳电子将通过辐射与非辐射跃迁的方式一级一级的向内壳集体退激发至 L, K 壳, 伴随着电子的级联退激发离子会发出 $K\alpha$ 和 $K\beta$ X 射线, 所以 X 射线谱的信息就对应着特定的俘获和退激发过程. 射线分支比和平均能量也是特定的, 反映了低速高电荷态 Ar^{17+} 离子在金属表面以下空心原子形成与退激发过程.

[1] Schenkel T, Barnes A V, Niedermayr T R, Hattass M, Newman M W, Machicoane G A, McDonald J W, Hamza A W, Schneider D H 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 4273

[2] Hattass M, Schenkel T, Barnes A V, Barnes A V, Newman M W, McDonald J W, Niedermayr T R, Machicoane G A, Schneider D H 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 4795

[3] Stolterfoht N, Niemann D, Hoffmann V, Rösler M, Baragiola R A 2000 *Phys. Rev. A* **61** 052902-1

[4] Xiao G, Schiwietz G, Grand P L, Stolterfoht N, Schmoltdt A, Grether M, Köhrbrück R, Spieler A, Stettner U 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 1821

[5] Schenkel T, Briere M A, Schmidt-Böcking H, Bethge K, Schneider D 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2481

[6] Karim K R, Grabe S R, Bhalla C P 1996 *J. Phys. B* **29** 4007

[7] Briand J P, dEtat-Ban B, Schneider D, Briere M A, Decaux V, McDonald J W 1996 *Phys. Rev. A* **53** 2194

[8] Winecki S, Stöckli M P, Cocke C L 1997 *Phys. Rev. A* **56** 538

[9] Briere M A, Schenkel T, Schneider D H, Bauer P, Arnau A 1997 *Phys. Scr.* **T 73** 324

[10] Huang W, Lebius H, Schuch R, Grether M, Stolterfoht N 1998 *Phys. Rev. A* **58** 2962

[11] Winecki S, Cocke C L, Fry D, Stöckli M P 1996 *Phys. Rev. A* **53** 4228

[12] Huang W, Lebius H, Schuch R, Grether M, Stolterfoht N 1997 *Phys. Rev. A* **56** 3777

[13] Schenkel T, Briere M A, Barnes A V, Hamza A V, Bethge K, Schmidt-Böcking H, Schneider D 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 2030

[14] Winecki S, Stöckli M P, Cocke C L 1997 *Phys. Rev. A* **55** 4310

[15] Juaristi J I, Arnau A, Echenique P M, Winter H 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 1048

[16] Eder H, Vana M, Aumayr F, Winter H P 1997 *Rev. Sci. Inst.* **68** 165

[17] Lemell C, Stöckl J, Burgdörfer J, Betz G, Winter H P, Aumayr F 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 1965

[18] Aumayr F, Kurz H, Schneider D, Briere M A, McDonald J W, Cunningham C E, Winter H P 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 1943

[19] Ibach H (Ed.) 1977 *Electron Spectroscopy for Surface Analysis* (Springer-Verlag, Berlin, Germany)

[20] Das J, Morgerstern R 1993 *Phys. Rev. A* **47** 755

[21] Zhao Y T, Xiao G Q, Xu Z F, Qayyum Abdul, Wang Y Y, Zhang X A, Li F L, Zhan W L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5734 (in Chinese) [赵永涛、肖国青、徐忠锋、Qayyum Abdul、王瑜玉、张小安、李福利、詹文龙 2007 物理学报 **56** 5734]

[22] Briand J P, Schneider D, Bardin S, Khemliche H, Jin J, Xie Z, Prior M 1997 *Phys. Rev. A* **55** 3947

[23] Schulz M, Coke C L, Hagmann S, Stöckli M, Schmidt-Böcking H 1991 *Phys. Rev. A* **44** 1653

[24] Clark M W, Schneider D, Dewitt D, McDonald J W, Bruch R, Safronova U I, Tolstikhina I Yu, Schuch R 1993 *Phys. Rev. A* **47** 3983

[25] Schenkel T, Hamza A V, Barnes A V, Schneider D H 1999 *Pro. Sur. Sci.* **61** 23

[26] Machicoane G A, Schenkel T, Niedermayr T R, Newmann M W, Hamza A V, Barnes A v, McDonald J W, Tanis J A, Schneider D H 2002 *Phys. Rev. A* **65** 042903-1

[27] Schuch R, Schneider D, Knapp D A, DeWitt D, McDonald J, Chen M H, Clark M W, Marrs R E 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1073

[28] Yang Z H, Song Z Y, Chen X M, Zhang X A, Zhang Y P, Zhao Y T, cui Y, Zhang H Q, Xu X, Shao J X, Yu D Y, Cai X H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2221 (in Chinese) [杨治虎、宋张勇、陈熙萌、张小安、张艳萍、赵勇涛、崔莹、张红强、徐徐、邵健雄、于得洋、蔡晓红 2006 物理学报 **55** 2221]

[29] Zhao Y T, Xiao G Q, Zhang X A, Yang Z H, Chen X M, Li F L, Zhang Y P, Zhang H Q, Cui Y, Shao J X, Xu X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 85 (in Chinese) [赵勇涛、肖国青、张小安、杨治虎、陈熙萌、李福利、张艳萍、张红强、崔莹、邵健雄、徐徐 2005 物理学报 **54** 88]

[30] Chen X M, Shao J X, Yang Z H, Zhang H Q, Cui Y, Xu X, Xiao G Q, Zhao Y T, Zhang X A, Zhang Y P 2007 *Eur. Phys. J. D* **41** 281

[31] Yang Z H, Ma X W, Wang Y D, Liu H P, Yu Y D 2000 *The Astrophysical Journal* **544** 572

[32] Yang Z H, Du S B, Zeng X T, Chang H W, Zhang B L, Wang W, Yu D Y, Cai X H 2009 *The Astronomical Journal* **137** 4020

[33] Yang Z H, Du S B, Zeng X T, Chang H W, Zang B L, Zhu K X, Yu D Y, Cai X H 2008 *Eur. Phys. J. D* **47** 33

[34] Varga P, Neidhard T, Sporn M, Libiseller G, Schmid M, Aumayr F, Winter H P 1997 *Phys. Scr.* **T 73** 307

[35] Kakutani N, Azuma T, Yamazaki Y, Komaki K 1995 *J. Appl. Phys.* **34** L580

[36] Schenkel T, Barnes A V, Hamza A V, Schneider D H 1998 *Euro. Phys. J. D* **1** 297

[37] Briand J P, de Billy L, Charles P, Essabaa S 1990 *Phys. Rev. Lett.* **65** 159

[38] Winecki S, Cocke C L, Fry D, Stockli M P 1996 *Phys. Rev. A* **53** 4228

[39] Burgdorfer J, Reinhold C, Meyer F 1995 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **98** 415

[40] Donets E D 1985 *Nucl. Instum. Methods Phys. Res. Sect. B* **9** 522

[41] McGuire E J 1971 *Phys. Rev. A* **3** 587

[42] Chen M H, Crasemann B, Mark H 1979 *At. Data Nucl. Data Tabl.* **24** 13

[43] Bhalla C P 1973 *Phys. Rev. A* **8** 2877

[44] Manson S T, Kennedy D J 1974 *At. Data Nucl. Data Tables* **14** 111

[45] Scofield J H 1974 *At. Data Nucl. Data Tables* **14** 121

[46] Bhalla C P 1973 *Phys. Rev. A* **18** 2877

[47] Bearden J A 1967 *Rev. Mod. Phys.* **39** 78

$K\beta/K\alpha$ ratios and energies of the K -shell X ray of Ar^{17+} ion in the interaction with metals^{*}

Zou Xian-Rong Shao Jian-Xiong Chen Xi-Meng[†] Cui Ying

(School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

(Received 10 September 2009; revised manuscript received 3 December 2009)

Abstract

The K X-rays emitted from the incident slow highly charged Ar^{17+} ions are investigated in the interaction with various metal target such as Be, Al, Ni, Mo and Au. The $K\beta/K\alpha$ ratios and the mean energies of the emitted X-rays are extracted and analyzed from our previous experimental results [28, 29]. It is found that the ratios and the energies are almost independent of the ion velocity and the target element. Meanwhile, a model based on the conductive-electron capture and the cascading de-excitation model is proposed to interpret the experiment. Excellent agreement is found between the theoretical results and the experimental data.

Keywords: highly charged ion, X-ray, cascading de-excitation, $K\beta/K\alpha$ ratio

PACC: 3450D, 3220R, 3270J

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10804039 and 10574132).

[†] Corresponding author. E-mail: chenxm@lzu.edu.cn