

光电离过程中 Fe 靶和 V 靶特征辐射的角相关研究*

柳钰^{1)2)†} 徐忠锋¹⁾ 王兴¹⁾ 曾利霞²⁾ 刘婷²⁾

1) (西安交通大学理学院, 西安 710049)

2) (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)

(2019年10月9日收到; 2019年12月16日收到修改稿)

在发射角 120° — 170° 的范围内, 应用硅漂移探测器以 10° 为间隔对中心能量为 13.1 keV 的韧致辐射诱发 Fe 靶和 V 靶发射的典型 K 系 X 射线光谱进行了测量. 得到特征 X 射线 K_α 和 K_β 的特征谱线, 考虑探测器对特征 X 射线的探测效率、靶对入射光子和出射光子吸收的校准及大气对特征 X 射线的吸收后, 结果显示不同探测角度下 K_β 与 K_α 的强度比为一常数. 将本次实验探测角度为 150° 时的 K_β/K_α 强度比值的实验值、理论计算值和 Ertuğral 的实验结果进行对比, 发现实验结果与预期相符. 对比不同探测角度下的强度比变化趋势推断特征 X 射线的角度依赖关系, 分析认为 K_α 和 K_β 在探测范围内是各向同性发射的.

关键词: 角分布, 光电离, 各向同性

PACS: 32.30.Rj, 32.70.Fw, 32.80.-t

DOI: 10.7498/aps.69.20191524

1 引言

近年来, 对特征 X 射线发射的研究主要集中在多电离效应^[1-3] 和碰撞过程中产生的空穴态定向行为方面的研究^[4,5]. 原子内壳层电离参数不仅为地质和化学等基础领域提供原子数据, 而且在粒子诱导 X 射线发射 (PIXE) 化学分析、X 射线荧光 (XRF) 光谱技术、健康物理剂量计算以及原子和核过程等方面也都有广泛应用^[6-11].

碰撞电离导致靶原子内壳层产生空穴的退激过程对应发射特征 X 射线或俄歇电子^[12]. 光电离产生 X 射线强度比与电子、重离子、质子轰击和放射性衰变产生的 X 射线强度比有很大差异, 从 K 壳层 ($J = 1/2$) 产生的 X 射线在理论上被认为是各向同性发射的^[13,14], 有很多实验在固定出射方向

上对靶材产生特征 K 壳层 X 射线强度比进行了研究, 然而却没有在不同出射方向上对靶材产生特征 K 壳层 X 射线强度比进行实验研究, 也就是说光电离导致固体靶产生 K 壳层 X 射线角分布的实验研究还很缺乏^[15]. 因此, 通过测量光电离过程中的典型 X 射线强度来研究特征 X 射线发射的角依赖关系变得越来越重要.

为了研究 K 壳层电离参数, 很多实验利用高分辨率固体 X 射线探测器对其进行了实验研究, 在这些实验中, K 壳层空穴分别由不同方式产生. Slivinsky 和 Ebert^[16] 使用能量小于 150 keV 的 X 光机产生的韧致辐射束来激发靶材, 测定了 $29 \leq Z \leq 92$ 元素薄靶的 K_α/K_β 值. Ertuğral 等^[17] 测量了以 ^{241}Am 同位素放射源作为激发源, 激发能为 59.5 keV 时, 对原子序数 $22 \leq Z \leq 69$ 范围内元素薄靶的 K_α/K_β 值. Richard 等^[18] 研究了 6—10 MeV

* 国家自然科学基金 (批准号: 11875219, 11405123)、陕西省科技厅自然科学基金 (批准号: 2019JQ-493)、陕西省教育厅科研计划 (批准号: 19JK0928) 和咸阳师范学院自然科学基金 (批准号: XSYK17008) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liuyuxianyang0625@126.com

质子和 15—19 MeV O^{4+} 离子激发薄的 Cu 靶产生的 K_{α}/K_{β} 值. Li 和 Watson^[19] 使用 2.35—12.5 MeV/amu 氦核, α 粒子和碳离子作为激发源对原子序数在 $19 \leq Z \leq 47$ 范围内元素靶材的 K_{β}/K_{α} 值进行了测定. Salem 和 Wimmer^[20] 完成对原子序数在 $30 \leq Z \leq 40$ 范围内元素的薄靶和厚靶分别使用 120 keV 电子轰击时 $K_{\alpha 1}/K_{\alpha 2}$ 跃迁概率的测量. Yalçin^[21] 和 Apaydin 等^[22] 分别测量了 V, Mo 等单质靶材在光电离过程中 K 系特征 X 射线发射的强度比. Akkus 等^[23] 研究了 Sc, V 等靶材在三个不同方位角下由 59.54 keV γ 光子激发产生 K_{β}/K_{α} 值. Ertuğral 等^[24] 测量了 5.9, 59.9 和 123.6 keV 光子对原子序数 $16 \leq Z \leq 92$ 范围内元素靶材的 K_{β}/K_{α} 值进行了测定. 同时, 还有很多科学家在理论方面对元素的 K_{β}/K_{α} 强度比率进行研究, 比如 Scofield^[25,26], Manson 和 Kennedy^[27] 基于相对论 Hartree-Fock 和 Hartree-Slater 理论对 K_{β}/K_{α} 强度比率的计算.

通过广泛的文献调研, 从我们得到的关于 K_{β}/K_{α} 强度比率的实验或理论数据中发现不同作者给出的结果是有差异的, 本实验的目的是验证中心能量为 13.1 keV 的韧致辐射垂直入射纯的 Fe, V 靶产生特征 K 壳层 X 射线 K_{β} , K_{α} 的角分布关系, 它可以提供有关内壳层电子的原子参数和波函数的重要信息.

2 实验装置及测量方法

实验装置如图 1 所示, Mini X 射线管与靶平面保持垂直, 且射线管出口距靶平面距离为 15 cm, 探测器与 X 射线管位于靶材的同侧, 且探测器出口距 X 射线管发射光子束与靶平面交点的距离为 15 cm, 靶的特征 X 射线 K_{α} , K_{β} 用 X 射线探测器在与靶平面法线夹角 120° — 170° 的范围内以 10° 为间隔来进行测量. Mini-X 射线管内置的靶材为 0.75 μm 厚的 Ag 靶, 设置管电压为 30 keV, 管电流为 90 μA , 电子轰击 Ag 靶会产生一个中心能量为 13.1 keV 的单峰韧致辐射谱, 在 Mini-X 射线管出口处加 $\Phi 2$ mm 的准直及滤波片 (材质为钨, 厚度为 25 μm). 在试验中测量 X 射线管发出 0—30 keV 韧致辐射轰击金属靶产生的特征 X 射线, 选用 Amptek 公司的 XR100-SDD (Super Drift Detectors) 型号 Si 漂移探测器, 探测器的有效探测

面积是 25 mm^2 , 探测器探测口安装了 12.5 μm 的 Be 窗, 其在 5.9 keV 峰处分辨率可达 125 eV. 实验测量中选择道数为 8192 道、增益为 100, 可探测能量范围为 0.5—14.5 keV, 探测器对 Fe 靶 K_{α} , K_{β} 的探测效率分别为 0.985 和 0.9895, 对 V 靶 K_{α} , K_{β} 的探测效率分别为 0.9704 和 0.977. 本工作中 X 射线强度比的误差大约为 14%, 包括统计误差 (3%), 探测器立体角误差 (6%), 背景误差 (6%), 高斯拟合误差 (5%).

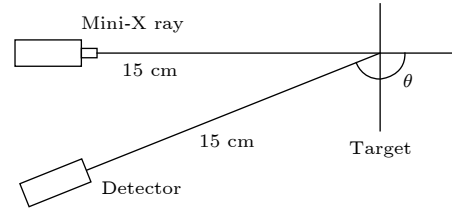


图 1 实验装置示意图

Fig. 1. Experimental setup.

3 实验结果与讨论

图 2 给出了 Mini X 射线光管出射中心能量为 13.1 keV 韧致辐射垂直入射靶材, 探测角度为 30° 时 Fe 和 V 靶的特征 X 射线能谱图, Fe 的特征 X 射线 $K_{\alpha 1}$ (K1 L3) 和 $K_{\alpha 2}$ (K1 L2) 的中心能量分别为 6.403 和 6.39 keV, V 的特征 X 射线 $K_{\alpha 1}$ (K1 L3) 和 $K_{\alpha 2}$ (K1 L2) 的中心能量分别为 4.952 和 4.94 keV, 而探测器在 5.9 keV 峰处分辨率为 125 eV, 所以无法分辨 Fe 的特征 X 射线 $K_{\alpha 1}$, $K_{\alpha 2}$ ($K_{\alpha 1}$ 和 $K_{\alpha 2}$ 的能量差是 13 eV) 与 V 的特征 X 射线 $K_{\alpha 1}$, $K_{\alpha 2}$ ($K_{\alpha 1}$ 和 $K_{\alpha 2}$ 的能量差是 12 eV), 我们统一记做 K_{α} . 对实验结果进行高斯拟合, 从图 2 可以看出, 拟合曲线和特征峰形状符合得非常好.

实验测得的 X 射线谱经过高斯拟合和计算可得到相应特征 X 射线发射强度. 通过了解各支壳层 X 射线的相对强度可以了解原子物理学中的各种现象. 本实验中没有观察到 Fe 和 V 靶的 K 壳层 X 射线明显的频移, 说明在实验范围内 K 壳层没有发生多电离. 特征峰 K_{α} 和 K_{β} 的计数由 2 条 X 射线拟合曲线确定. 实验中 X 射线的强度比 $I(K_i)/I(K_j)$ 可以由 (1) 式和 (2) 式确定.

$$\frac{I(K_{\beta})}{I(K_{\alpha})} = \frac{N(K_{\beta})\varepsilon(K_{\alpha})\xi(K_{\alpha})\lambda(K_{\alpha})}{N(K_{\alpha})\varepsilon(K_{\beta})\xi(K_{\beta})\lambda(K_{\beta})}, \quad (1)$$

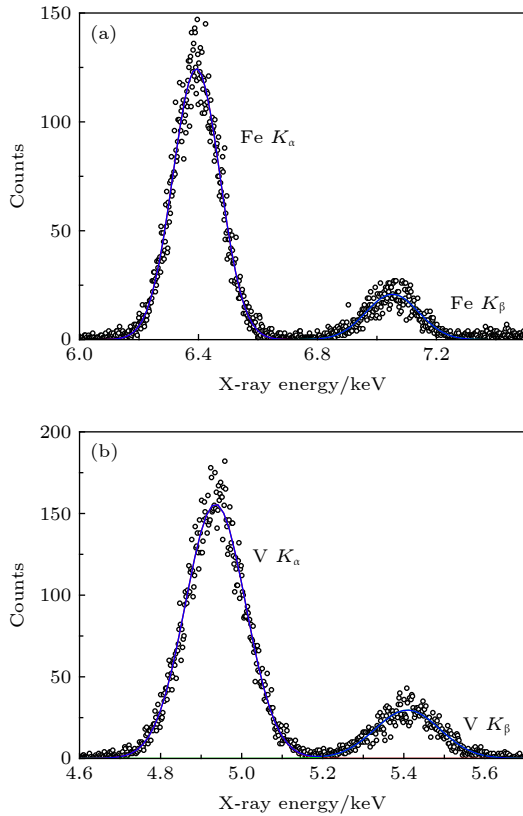


图 2 150°探测角下 Fe 靶和 V 靶的能谱分布图 (a) Fe 靶; (b) V 靶

Fig. 2. Characteristic K X-ray spectrum of Fe and V induced by impact with bremsstrahlung with central energy of 13.1 keV and measured at the emission angle of 150°: (a) Target Fe; (b) target V.

$$\lambda^\theta(L_i) = \frac{1 - \exp[-(\mu_{\text{inc}}/\cos\theta_1 + \mu_{\text{emt}}/\cos\theta_2)t]}{(\mu_{\text{inc}}/\cos\theta_1 + \mu_{\text{emt}}/\cos\theta_2)t}, \quad (2)$$

其中 $N(K_\alpha)/N(K_\beta)$ 表示 K_α 和 K_β 的计数比值, 也就是高斯拟合后对应 K_α 和 K_β 特征峰面积的比值; $\varepsilon(K_\alpha)/\varepsilon(K_\beta)$ 是探测器对不同特征 X 射线探测效率的比值, $\xi(K_\alpha)/\xi(K_\beta)$ 是靶与探测器之间空气对出射特征 X 射线吸收的校准因子之比; $\lambda(K_\alpha)/\lambda(K_\beta)$ 是靶对入射光子和出射光子吸收的校准因子之比, 由 (2) 式计算得到. μ_{inc} 是靶对入射光子的质量吸收系数, Fe 和 V 靶对入射光子的质量吸收系数分别为 100.1 和 70.8; θ_1 是入射束与靶平面法向的夹角; μ_{emt} 是靶对出射特征 X 射线的质量吸收系数, Fe 靶对特征 X 射线 K_α 和 K_β 的质量吸收系数为 73.2 和 54.87, V 靶对特征 X 射线 K_α 和 K_β 的质量吸收系数为 98.33 和 74.36; θ_2 是出射束与靶平面法向的夹角; t 是靶的质量厚度, 实验选用靶材厚度均为 1 cm, Fe 和 V 靶的质量厚度分别

为 7.845 和 6.11. 本实验中因为 t 的单位是 g/cm^2 , 所以 μ_{inc} 和 μ_{emt} 的单位为 cm^2/g .

从 K_α 和 K_β 特征 X 射线的自吸收考虑, 随探测角度的增大 K_α 的衰减效果要大于 K_β , Fe 靶特征 X 射线 K_α 和 K_β 的衰减幅度分别为 29% 和 25%, V 靶特征 X 射线 K_α 和 K_β 的衰减幅度分别为 36% 和 33%, 所以 $\lambda(K_\beta)/\lambda(K_\alpha)$ 比值应该随着探测角度的增大而增大, 这一结论是基于对 Fe, V 靶在相同冲击能量下由 (2) 式计算得出的.

Berezhko 和 Kabachnik^[28] 在 1977 年首先从理论上给出了电离原子退激过程中发射特征 X 射线的微分强度角分布公式:

$$\frac{dI}{d\Omega} = \frac{I_0}{4\pi}(1 + \beta P_2(\cos\theta)), \quad (3)$$

其中, $\beta = \alpha\kappa A_{20}$, $P_2(\cos\theta) = [3\cos(2\theta) + 1]/4$, θ 表示 X 射线出射方向与入射束方向的夹角; $d\Omega$ 为探测器对靶中心位置所张开的立体角; dI 代表在 θ 角出射方向上, $d\Omega$ 立体角范围内所探测到的 X 射线强度; I_0 为整个立体角内发射 X 射线的总强度; $P_2(\cos\theta)$ 为二阶勒让德函数; β 为特征 X 射线的各向异性参数, $\beta = \alpha\kappa A_{20}$, 其中 α 是与空穴初态和终态总角动量相关的动力学因子, 由 Berezhko 和 Kabachnik^[26] 研究表明对于特征 X 射线 K_α 和 K_β 的动力学因子 α 取值为 0, 也就是说理论上认为特征 X 射线 K_α 和 K_β 应该是各向同性发射的, κ 是 Coster-Kronig 跃迁校正因子, A_{20} 是对应支壳层的定向度. 从 (3) 式可以看出各向异性参数可以由不同角度的特征 X 射线强度分布得到.

在碰撞电离过程中, 磁亚态的集居数目有可能偏离统计分布, 在这种情况下, 能级是定向的, 因此两个具有相同磁量子数 (只有正负号差别) 的原子亚能级将会出现相同数目的集居. 这里假设在碰撞过程中电子和靶原子都没有被极化, 则电子态在 Z 轴两侧是对称的. 碰撞参数、散射角限制了各向异性参数 A_{20} 的数值. 原子内壳层空穴态的定向行为就可以由 A_{20} 这个参数来表示, 而 A_{20} 则决定于各磁亚态 μ_n 中的集居截面^[29].

从 K 壳层 ($J = 1/2$) 产生的 X 射线认为是各向同性发射的^[13,14], 经过 (2) 式的计算, Fe 和 V 靶的 K 壳层特征 X 射线强度比 K_β/K_α 与探测角 θ 角的依赖关系完整结果如图 3 所示, 在不确定度范围内, K_α 和 K_β 特征 X 射线在探测角 120°—170°范

围内时为一常数,也就是说特征 X 射线 K_α 和 K_β 在探测角范围内是各向同性分布的.

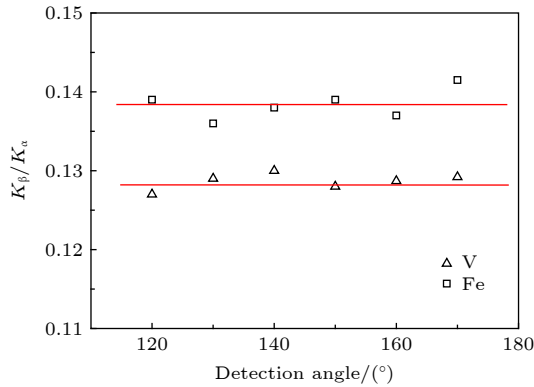


图 3 探测角为 120° — 170° 时, Fe 靶和 V 靶特征 X 射线强度比 K_β/K_α 的角分布关系

Fig. 3. Angular distribution of characteristic X-ray intensity ratios of K_β/K_α at detection angles of 120° – 170° for Fe and V.

将本实验值与理论计算值和 Ertuğral 等 [24] 实验结果进行对比, 结果如图 4 所示, 可以看出, 本实验探测角度为 150° 时, 采用中心能量为 13.1 keV 韧致辐射激发 Fe, V 靶的 K_β 与 K_α 特征 X 射线发射强度比 K_β/K_α 在实验误差范围内与基于相对论 Hartree-Fock 和 Hartree-Slater 理论预测值 [25–27] 和文献中 Ertuğral 等 [24] 以 59.5 keV 光子作为激发源的实验结果基本符合, 在 Ertuğral 等 [24] 的实验中, 激发源发出光束方向与靶面法线方向夹角为 45° , 探测器探测方向为垂直于靶面方向, 这说明在光电离过程中 K 系 X 射线发射的强度比几乎不随入射光子能量的改变而改变, 并且与入射光束与靶面法线方向夹角大小无关, 如果被探测靶材特征 X 射线 K_β 与 K_α 为各向异性发射, 则根据 (3) 式中 $P_2(\cos\theta) = (3\cos 2\theta + 1)/4$, 二阶勒让德多项式 $P_2(\cos\theta)$ 随 θ 角的变化而单调变化, 无论各向异性参数 β 取值为正或负, $dI/d\Omega$ 在 θ 等于 90° — 180° 区间内都是单调取值的, 则不同元素在实验探测角度为 150° 时的实验值应该与理论值 [25–27], 或探测角为 180° 的 Ertuğral 等 [24] 的实验值相比应同时增大或减小, 而本实验中实验结果与理论结果和他人实验结果相比, 对于 V 靶和 Fe 靶, 实验结果均高于文献 [25,26] 的理论结果, 对于 V 靶, 本实验值低于文献 [27] 的理论结果和文献 [24] 的实验结果, 对于 Fe 靶, 本实验值高于文献 [24] 的实验结果, 与文献 [27] 的理论结果基本相符, 也就是说本

实验值与理论值 [25–27]、Ertuğral 等 [24] 的实验值相比没有同时高于或低于的结果, 所以实验中探测到的 K_β 与 K_α 特征 X 射线均为各向同性发射.

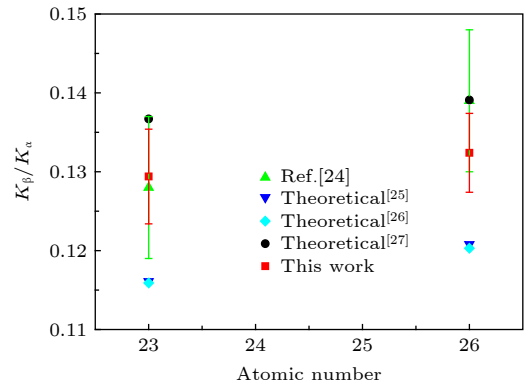


图 4 K_β/K_α 的实验值、Ertuğral [24] 的实验结果和理论计算值 [25–27] 对比图

Fig. 4. Comparison of X-ray intensity ratios K_β/K_α in the present work, literature experimental results from Ertuğral [24] and theoretical values [25–27].

应用多组态 Dirac-Fock 方法和密度矩阵理论可知 [14], 辐射场与电子相互作用的多极项将对光电子角分布产生一定影响, 光电子角分布的偶极和非偶极参数都会对各子壳层光电子角分布产生影响, 如果只考虑偶极项对光电子角分布的影响则 2s 壳层光电子角分布为各向同性发射; 由于 s 壳层的电子云呈球对称性分布, 所以非偶极项对 2s 壳层光电子角分布的影响非常小. 基于上述理论分析, K_β 与 K_α 特征 X 射线均为各向同性发射, 这与本实验结论完全一致.

此外, 研究 K 壳层的定向性行为, 还可以从 K 壳层的空穴态产生过程来分析. 由于 K 壳层不包括支壳层, 所以碰撞电离过程不包括 CK 跃迁, 在光子碰撞过程中 K 壳层的空穴由直接电离产生, 用 (4) 式和 (5) 式表示 K 壳层特征 X 射线产生截面

$$\sigma_{K_\alpha} = \sigma_K \omega_K F_{K_\alpha}, \quad (4)$$

$$\sigma_{K_\beta} = \sigma_K \omega_K F_{K_\beta}, \quad (5)$$

其中 σ_K 为 K 壳层电子的电离截面, ω_K 为 K 壳层的荧光产额, 表示辐射 X 射线的几率, 式中 F_{K_α} 和 F_{K_β} 是 K_α 和 K_β X 射线的分支比, 表示为 $F_{K_\alpha} = I_{K_\alpha}/(I_{K_\alpha} + I_{K_\beta})$, 且 $F_{K_\beta} = 1 - F_{K_\alpha}$, 因此可以看出, 在单电离的情况下, K 壳层 X 射线的产生截面比值 $\sigma_{K_\alpha}/\sigma_{K_\beta}$ 是与 K 壳层光电离截面无关的, 也就是说与入射光子能量无关. 当荧光产额一定

时, X 射线的产生截面实际反应的是内壳层的电离截面. 本实验表明, 考虑靶的自吸收效应后, 在测量不确定度范围内, 一定入射能量下 K_{β}/K_{α} 强度比值是不随探测角度的变化而变化的, 该不变性可以定性解释为考虑到 K_{α} 和 K_{β} X 射线光子都是通过直接电离过程从靶材的同一点产生的, 而间接过程(荧光)在碰撞过程中是可以忽略的^[30]. 因此, 观察到的 K_{β}/K_{α} 比值随出射角的变化为一常数.

同时从实验结果观察到, 高原子序数元素的强度比 K_{β}/K_{α} 的比值更高, 这是因为随原子序数的增加原子外壳层拥有更多的电子, K_{β} X 射线的产生截面随着原子序数的增加而增加. 因此, 较大原子序数元素的特征 X 射线 K_{β} 与 K_{α} 的强度比也比较小的原子序数元素大.

4 结 论

本文测量了中心能量为 13.1 keV 韧致辐射激发厚 Fe ($z = 26$) 和 V ($z = 22$) 靶材产生的特征 X 射线 K_{α} 和 K_{β} 谱线, 并计算了 K_{β}/K_{α} 特征 X 射线强度比的角分布关系. 实验结果显示在探测角 θ 范围内 Fe 和 V 靶特征 X 射线 K_{α} 和 K_{β} 呈各向同性发射, 在实验误差范围之内, 实验数据没有发现任何各向异性发射趋势. 这一实验结果与理论分析完全一致. 此外, 通过探测角度为 150° 时靶材特征 X 射线强度比 K_{β}/K_{α} 的本次实验数值与理论值^[25-27]、Ertuğral 等^[24] 的实验数值比较, 说明入射光子能量的变化对特征 X 射线比值的结果在该入射能量范围内无影响, 且改变入射光束方向不影响 K_{β}/K_{α} 特征 X 射线强度比. 实验结果还表明, 靶材 Fe 的 K_{β}/K_{α} 特征 X 射线强度比值比靶材 V 的 K_{β}/K_{α} 特征 X 射线强度比值大 8%, 说明较大原子序数元素的特征 X 射线 K_{β} 与 K_{α} 的强度比也比较小的原子序数元素大.

参考文献

[1] 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]
- [2] Horvat V, Watson R L, Blackadar J M 2008 *Phys. Rev. A* **77** 032724
- [3] Liang C H, Zhang X A, Li Y Z, Zhao Y T, Zhou X M, Wang X, Mei C X, Xiao G Q 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 243201 (in Chinese) [梁昌慧, 张小安, 李耀宗, 赵永涛, 周贤明, 王兴, 梅策香, 肖国青 2018 物理学报 **67** 243201]
- [4] Han I, Şahin M, Demir L 2009 *Appl. Radiat. Isot.* **67** 1027
- [5] Salem S, Stöhlker, T, Demian A B, Haggmann S, Kozhuharov C, Liesen D, Gumberidze A 2013 *Phys. Rev. A* **88** 012701
- [6] Smit Ž 2005 *Nucl. Instrum. Methods B* **240** 258
- [7] Romo-Kröger C M 2010 *Vacuum* **84** 1250
- [8] Ma K, Dong C Z, Xie L Y, Qu Y Z 2014 *Chin. Phys. Lett.* **31** 103201
- [9] Mu Z D, Wei Q Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 083402 (in Chinese) [牟致栋, 魏琦瑛 2014 物理学报 **63** 083402]
- [10] Freemantle C S, Sacks N, Topic M, Pineda-vargas C A 2014 *Nucl. Instrum. Methods B* **318** 168
- [11] Kada W, Kishi A, Sueyasu M, Sato F, Kato Y, Iida T 2014 *Nucl. Instrum. Methods B* **318** 51
- [12] Fernandez J E, Scot V, Verardi L, Salvat F 2014 *Radiat. Phys. Chem.* **95** 22
- [13] Flugge S, Mehlhorn W, Schmidt V 1972 *Phys. Rev. Lett.* **29** 7
- [14] Ma K, Xie L Y, Zhang D H, Dong C Z, Qu Y Z 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 083201 (in Chinese) [马堃, 颀录有, 张登红, 董晨钟, 屈一至 2016 物理学报 **65** 083201]
- [15] Wang X, Xu Z F, Cheng L 2016 *Radiat. Phys. Chem.* **122** 24
- [16] Slivinsky V W, Ebert P J 1969 *Phys. Lett. A* **29** 463
- [17] Ertugrul M, Sogut O, Simsek O, Buyukkasap E 2001 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **34** 909
- [18] Richard P, Bonner T I, Furuta T, Morgan I L, Rhodes J R 1970 *Phys. Rev. A* **1** 1044
- [19] Li T K, Watson R L 1974 *Phys. Rev. A* **9** 1574
- [20] Salem S I, Wimmer R J 1970 *Phys. Rev. A* **2** 1121
- [21] Yalçın P 2007 *Nucl. Instrum. Methods B* **254** 182
- [22] Apaydın G, Ayhıkcı V, Cengiz E, Kaya N, Kobya Y, Tıraşoğlu E 2008 *Radiat. Phys. Chem.* **77** 923
- [23] Akkus T, Sahin Y, Yılmaz D, Tuzluca F N 2017 *Can. J. Phys.* **95** 220
- [24] Ertuğral B, Apaydın G, Cevika U, Ertuğrul M, Kobya A I 2007 *Radiat. Phys. Chem.* **76** 15
- [25] Scofield J H 1974 *Phys. Rev. A* **9** 1041
- [26] Scofield J H 1974 *At. Data Nucl. Data Tables* **14** 121
- [27] Manson S T, Kennedy D J 1974 *At. Data Nucl. Data Tables* **14** 111
- [28] Berezhko E G, Kabachnik N M 1977 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **10** 2467
- [29] Kanaya K, Okayama S 1972 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **5** 43
- [30] Yadav N, Bhatt P, Singh R, Llovet X, Shanker R 2011 *Appl. Radiat. Isot.* **69** 1380

Angular distribution of characteristic X-ray emission from Fe and V following photoionization*

Liu Yu^{1)2)†} Xu Zhong-Feng¹⁾ Wang Xing¹⁾ Zeng Li-Xia²⁾ Liu Ting²⁾

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

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

(Received 9 October 2019; revised manuscript received 16 December 2019)

Abstract

The de-excitation process of vacancy in the inner shell of the target atom caused by collision ionization produces the characteristic X-ray or Auger electrons. The precise measurement of ionization cross sections plays an important role in many basic research fields, as well as in practical fields, such as chemical analysis of Particle Induced X-ray Emission (PIXE), atomic and nuclear processes, and X-ray fluorescence (XRF) spectroscopy. As we know, when ionization cross sections are measured precisely, whether the emission of X-ray is isotropic in collision process must be considered. However, there have been few experimental results for angular dependence of K_β/K_α intensity ratios in the literature until now. Therefore, this study aims to verify that the K_α and K_β X-rays originated from filling of the K shell vacancies with total angular momentum quantum number $1/2$ ($J = 1/2$) are isotropic.

In this work, the typical K -shell X-ray spectra for Fe and V, which induced by bremsstrahlung with central energy of 13.1 keV, have been measured at emission angles varied from 120° to 170° at intervals of 10° . The characteristic X-ray spectra obtained by the detector are fitted by Gauss function, where the absorption of incident X-rays by the detector, the absorption of emitted X-rays by the atmosphere and the self-absorption correction factor of incident and emitted X-rays by the target are all taken into account.

The experimental results of K_β/K_α intensity ratio in this experiment coincide with those of theoretical calculation, as well as the Ertuğral's experimental result. The experimental results show that the intensity ratio of K_β/K_α is a constant at different detection angles. Therefore it can be concluded that the emission of K_α and K_β is isotropic in the detection range. Since the K shell has no sub-shell, there is no Coster-Kronig transition in the collision ionization process. In the process of photoionization, the vacancies in the K shell are produced by direct ionization. As a result, the cross section ratio of K shell X-ray generation is independent of the K shell photoionization cross section. In addition, the experimental results show that the K_β/K_α characteristic X-ray intensity ratio of target Fe is 8% higher than that of target V, which are consistent with the theoretical analysis results that the characteristic X-ray intensity ratio depends on the target atomic number Z .

Keywords: angular distribution, photoionization, isotropy

PACS: 32.30.Rj, 32.70.Fw, 32.80.-t

DOI: 10.7498/aps.69.20191524

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11875219, 11405123), the Natural Science Basic Research Plan of Shaanxi Province, China (Grant No. 2019JQ-493), the Scientific Research Program Funded by Shaanxi Provincial Education Department, China (Grant No. 19JK0928), and the Scientific Research Program Funded by Xianyang Normal University (Grant No. XSYK17008).

† Corresponding author. E-mail: liuyuxianyang0625@126.com