

X射线质量衰减截面和光电截面的高精度测量*

王大梅

(北京师范大学低能核物理所, 北京市辐射中心 北京 100875)

0434.14

摘要 利用特征X射线源系统地测量了Si、Fe、Cu、Y、In、Sn等六种元素及SiH₄的X射线质量衰减系数,实验误差为±1%。

关键词 X射线 质量吸收系数 光电截面 衰减截面 硅铁

分类号 O434.14

1 引言

X射线质量吸收系数或衰减截面的实验测量已有几十年的历史了,在很宽的能区里已经测得了大量的实验数据.在此基础上,汇编了许多元素的X射线质量吸收系数的数据表及拟合公式^[1~4],并从理论上系统地计算了光电截面^[5]、瑞利散射截面^[6]和康普顿散射截面^[7].这些理论截面值在相当好的精度范围内和实验结果一致.利用这些数据表或拟合公式可以内插和外推,从而获得有用的数据,对辐射屏蔽、核技术应用、核医学等许多领域作出了重要贡献.然而,这些实验数据基本上都是70年代以前的结果,实验点少,实验误差较大,不能满足当今科学与技术对这类原子数据提出的高精度要求,不少元素至今仍缺乏实验结果,更需要从实验上测量这些元素的有关数据.

2 高能质子束激发单元素靶或化合物靶产生的特征X射线源

高能质子能以很高的几率激发元素的特征X射线,而本底很低.用高纯度材料做靶,合理设计靶室的结构,使用高分辨率的Si(Li)谱仪,对多数元素的KX和LX特征谱线的信噪比可高达200~300.这种特征谱线是准单色的,具有如下优点:

- 1)信噪比高
- 与放射性同位素X射线源或X光机-二

次靶组合X射线源相比,信噪比高1~2个数量级.

2)能量点多

用高纯度的Al、Si、KCl、KI、Ti、V、Fe、Ni、Cu、Au、Pb、Y、Nb、Mo、Ag、In、Sn等元素做靶,用2.5 MeV质子束轰击这些靶,则在1.486~29.109 keV能区里可激发出50条以上的特征谱线供实验使用,可系统而精确地测量本能区里的质量衰减系数,不像放射性同位素源那样只有一个或几个能量点,影响一段能区的数据精度.这种准单色特征X射线源还可以用于其它场合,如仪器刻度.

3)X射线源的强度可调

改变质子束的流强或靶厚,可获得实验所需的合适的X射线源强度.例如,在实验中,通过调节束流强度或靶厚度使对每一个特征峰的记数都能在200~400 s内累计到10⁴~10⁵,从而保证了实验结果的高精度.

首先提出并使用的这套X射线源,是一种具有特色的新型X射线源,它丰富了质量衰减系数测量用源.

3 质量衰减系数的测量

实验是在北师大串列加速器上进行的.2.5 MeV质子束轰击靶室中央的无衬单元素靶,产生该元素的特征X射线,X射线穿过与入射质子束成135°的Mylar膜窗引出真空靶室外或通过Mylar窗引入气体(如SiH₄)吸收

* 国际原子能机构(IAEA)研究合同资助课题,课题编号 RCP-5470/RB.

室,并经铅和铝光栏组成的准直器形成窄的X射线束,垂直入射到样品元素吸收膜上(或 SiH_4 吸收气体上),穿过吸收膜的X射线再经准直后被 $\text{Si}(\text{Li})$ 探测器测量,由多道分析器和计算机进行分析.与入射质子束成 135° 的另一侧是 Au-Si 面垒探测器,用以测量靶的背散射质子谱,用它来监测和归一入射到吸收膜(或吸收气体)上的X光子通量. $\text{Si}(\text{Li})$ 系统对X射线谱测量时采用多道分析器活时间为计数所定时间.背散射质子监测器计数与 $\text{Si}(\text{Li})$ 计数同步进行,但在所定活时间相等的真时间内提前结束计数.从而利用两者的时间差对X射线谱测量进行死时间的自动修正.

实验所用的无衬单元素靶膜,是用高纯度元素材料由真空蒸发方法和滚压法制备.吸收膜用高纯度(好于99.98%)元素材料滚压而成,一般都有二十几个厚度等级,以适应不同X射线能量点的实验要求.为了互相校核和确保准确性,吸收膜由两台百万分之一克的精度天秤称重,用两台读数显微镜测量面积,从而得到吸收膜厚度(以 g/cm^2 为单位)的平均值.尽量选用滚压制备膜的中心区部分,以保证膜的均匀性好于0.5%.

实验测得经不同厚度 $t(\text{g}/\text{cm}^2)$ 吸收膜(或不同气压的吸收气体)后的X射线谱,用AXIL解谱程序分析得到相应于某一特征X射线的强度(总计数),经背散射质子监测器计数归一后,便得到无吸收膜和经不同厚度吸收膜后的X射线强度 $I(0)$ 和 $I(t)$,用最小二乘法拟合下列方程

$$\ln I(t) = \ln I(0) - \mu_p(L) \cdot t \quad (1)$$

便可得到相应于X射线能量的质量衰减系数 $\mu_p(L)$ (cm^2/g),由于 $\mu_p(L)$ 中包含了射入探测器的各种散射的贡献 $\Delta\mu_p$,只有扣除这部分贡献后才是所需的质量衰减系数,即 $\mu_p = \mu_p(L) - \Delta\mu_p$. $\Delta\mu_p(L)/\mu_p(L)$ 一般小于0.5%.总的衰减截面为

$$\sigma_{\text{Tot}} = \frac{\mu_p A}{N_A} \times 10^{24}, (b/\text{atom}) \quad (2)$$

式中, A 是元素的原子质量, N_A 是阿佛加德罗常数,实验中对每条特征X谱线要选择5种以上不同厚度的吸收膜(或不同气压的吸收气体)进行穿透测量,这些厚度所满足的要求为

$$2 \leq \ln \frac{I(0)}{I(t)} \leq 4 \quad (3)$$

对气体吸收体,必须满足范德瓦耳斯方程:

$$(P - aN^2/V^2) \cdot (V/N - b) = RT \quad (4)$$

式中, V 为吸收气体的有效体积(升), P 为气压(大气压), T 为绝对温度(度), N 为气体量(摩尔), R 为气体常数(大气压·升/摩尔·度), a (升 2 ·大气压/摩尔 2)和 b (升/摩尔)为吸收气体的两个参数.通过(4)式可以求得单位面积上的摩尔数 n 及吸收气体的厚度 $t = M \cdot n$ (g/cm^2), M 是吸收气体的摩尔分子量.

X射线和单质原子的相互作用总截面可表示为

$$\sigma_{\text{Tot}} = \sigma_{\text{pe}} + \sigma_{\text{R}} + \sigma_{\text{c}} \quad (5)$$

或

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{Tot}} &= \sigma_{\text{pe}} + \sigma_{\text{c}} + \sigma_{\text{LB}} + \sigma_{\text{TDS}} \\ &\approx \sigma_{\text{pe}} + \sigma_{\text{c}} + \sigma_{\text{TDS}} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 σ_{pe} 、 σ_{R} 、 σ_{c} 、 σ_{TDS} 和 σ_{LB} 分别为光电(吸收)截面、瑞利散射截面、康普顿散射截面、热漫散射截面和劳厄-布利格散射截面. σ_{LB} 一般很小.(5)式适于各向同性的材料,(6)式适于单晶材料而且没有布喇格反射的测量方位.

元素的康普顿散射截面、瑞利散射截面、热漫散射截面根据实验几何由数字积分求得.

4 实验结果

实验测得质量衰减系数、总截面和光电截面都用图、表的形式已由文献[8~13]给出.质量衰减系数的实验误差为 $\pm 1\%$.这一结果不仅极大地提高了实验精度,而且填补了许多元素在该能区的数据空白.从实验测得的总截面中扣除康普顿散射和瑞利散射截面或热漫散射截面便得到了元素的光电截面值,并与理论值进行了比较和讨论.

参 考 文 献

- 1 Veigele W M J. Photon Cross Sections from 0.1 keV to 1 MeV for Elements $Z=1$ to $Z=94$. Atomic Data, 1973, 5, 51~111
- 2 Hubbell J H. Photon Mass Attenuation and Energy-absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV. Int J Appl Radiat Iupt, 1982, 33, 1269~1290
- 3 McMaster W H, Grande N K D, Mallett J H et al. U-CRL-50174, 1969
- 4 Montengro E C, Baptista G B and Duarte P W E P. K and L X-ray Mass Attenuation Coefficients for low-Z Materials. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1978, 22, 131~177
- 5 Scofield J H. Theoretical Photoionization Cross Sections from 1 keV to 1500 keV. Lawrence Livermore National Laboratory Report, UCRL-51326, 1973
- 6 Hubbell J H and Cverbo L. Relativistic Atomic form Factors and Photon Coherent Scattering Cross Sections. J Phys Chem Ref Data, 1979, 8, 69~104
- 7 Hubbell J H, Veigele W J, Briggs E A et al. Atomic form Factors, Incoherent Scattering Functions, and Photon Scattering Cross Sections. J Phys Chem Ref Data, 1975, 5, 471~538
- 8 王大椿, 杨华, 罗平安等. X-ray Attenuation Coefficients and Photoelectric Cross Sections of Sn for the Energy Range 3.3 keV to 29.1 keV. 原子与分子物理学报, 1991, 8(3): 1914~2109
- 9 Wang Dachun, Ding Xunliang, Wang Xinfu et al. X-ray Attenuation Coefficients and Photoelectric Cross Sections of Cu and Fe in the Range 3 keV to 29 keV. Nucl Instr and Meth, 1992, B71: 241~248
- 10 Wang Dachun, Yang Hua, Luo Pingan. Measurements of the Mass Attenuation Coefficients of Tin with Characteristic Lines from Elements Excited by Energetic Protons. Nucl Instr and Meth, 1994, B86: 231~235
- 11 Wang Dachun, Yang Hua, Wang Xinming. Mass Attenuation Coefficients of Indium in the Energy Range 2.6 keV to 29.1 keV. Nucl Instr and Meth, 1994, B86: 236~240
- 12 Wang Dachun, Ding Xunliang, Yang Hua et al. Mass Attenuation Coefficients for Elements Measured with Characteristic X-ray from Targets Excited by Energetic Proton. Acta Physica Sinica (Overseas Edition), 1992, 1(2): 138~148
- 13 Wang Dachun, Lao Pingan, Yang Hua. Measurement of the Mass Attenuation Coefficients for SiH_4 and Si. Nucl Instr and Meth, 1995, B95: 161~165

Measurement of Mass Attenuation and Photoelectric Cross Sections of Elements with High Accuracy in X-ray Energy Range

WANG Dachun

(Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University,
Beijing Radiation Center, Beijing 100875)

Abstract By using the characteristic X-ray sources and the Si(Li) detector system, the X-ray mass attenuation coefficients for Si, Fe, Cu, Y, In, Sn and SiH_4 have been systematically measured in the energy range of 1.486~29.109 keV. The accuracy of experimental data has been reduced to $\pm 1\%$.

Key Words X-ray mass attenuation coefficient photoelectric cross section attenuation cross section