

10—25 keV 电子致厚 W,Au 靶韧致辐射谱的测量

谭文静 安竹 朱敬军 赵建玲 刘慢天

Bremsstrahlung spectra produced by 10--25 keV electron impact on thick W, Au targets

Tan Wen-Jing An Zhu Zhu Jing-Jun Zhao Jian-Ling Liu Man-Tian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 113401 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.113401

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.113401>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中能高浓度氦离子注入对钨微观结构的影响

Microstructure of medium energy and high density helium ion implanted tungsten

物理学报.2016, 65(7): 077803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.077803>

紫外脉冲激光退火发次对 KDP 晶体抗损伤性能的影响

Effect of raster scan number on damage resistance of KDP crystal irradiated by ultraviolet pulse laser

物理学报.2013, 62(14): 147803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.147803>

金属-氧化物-半导体场效应管辐射效应模型研究

A radiation degradation model of metal-oxide-semiconductor field effect transistor

物理学报.2012, 61(10): 107803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.107803>

基于辐照前 1/f 噪声的金属-氧化物-半导体场效应晶体管潜在缺陷退化模型

A latent defect degradation model of metal-oxide-semiconductor field effect transistor based on pre-irradiation 1/f noise

物理学报.2012, 61(6): 067801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.067801>

10—25 keV 电子致厚 W, Au 靶韧致辐射谱的测量*

谭文静 安竹[†] 朱敬军[‡] 赵建玲 刘慢天

(四川大学原子核科学技术研究所, 辐射物理及技术教育部重点实验室, 成都 610064)

(2015 年 12 月 25 日收到; 2016 年 3 月 19 日收到修改稿)

测量了 10—25 keV 电子碰撞厚 W, Au 靶产生的韧致辐射谱, 并与 Monte Carlo 程序 PENELOPE 模拟的 X 射线谱进行了比较, 除在 3 keV 前实验谱略低于理论谱外, 整体上两者符合得很好. 在模拟电子与靶材料相互作用产生韧致辐射时, PENELOPE 程序中只包含有普通韧致辐射的截面数据. 实验结果表明, 在电子与固体靶相互作用时, 没有明显的极化韧致辐射产生, PENELOPE 程序能够可靠地描述电子与固体厚靶相互作用产生的韧致辐射.

关键词: 电子碰撞, 韧致辐射, Monte Carlo 模拟

PACS: 34.80.-i, 78.70.-g, 02.70.Uu

DOI: 10.7498/aps.65.113401

1 引言

电子碰撞产生韧致辐射 (EB) 的研究对理解电子在材料中的运动过程有重要意义. 同时, 准确描述 EB 对电子探针显微定量分析、医疗及分析用 X 射线源的设计、高能电子束的剂量测量以及高能辐射运输研究等也具有重要作用^[1]. 在热核聚变研究中, EB 可用在氚 β 衰变诱发 X 射线谱 (BIXS) 技术上^[2,3]. BIXS 方法通过探测氚 β 衰变发出的 β 射线与材料相互作用产生的特征 X 射线和韧致辐射来分析材料中的氚含量和深度, 韧致辐射谱的精确计算和测量决定着 BIXS 分析技术的精确度.

早期的韧致辐射研究是基于电子进入点库仑势场中的玻恩近似或者非相对论解析计算结果, 并称该种韧致辐射为普通韧致辐射 (OB). Tseng 和 Pratt^[4] 发展了一套相对论方法计算韧致辐射, 形成了目前广泛应用的韧致辐射能量谱表^[5,6]和形状函数表^[7]; 基于 Tseng 和 Pratt 等的结果, Seltzer 和 Berger^[8,9] 发表了入射电子能量范围为 1 keV—10 GeV、原子序数范围为 1—92 的韧致辐射标度微分截面数据表, 被认为是目前最可靠的理论结果.

在 EB 研究中, 靶材料主要有气体靶材和固体靶材, 固体靶又可分为薄靶和厚靶. 入射到靶上的电子束通过电离、激发和发射韧致辐射损失能量, 发射的 EB 光谱是由能量从零到电子入射能量的光子组成的连续谱. 影响 EB 光谱形状和强度的主要因素是入射电子与靶原子相互作用产生韧致辐射的微分截面, 以及入射电子与靶原子的散射和 X 射线的发射等^[10], 此外, 在电离过程中产生的二次电子在随后的相互作用中也会产生光子, 在光子进入探测器的过程中, X 射线在靶中还会发生衰减^[10].

除 OB 之外, 极化韧致辐射 (PB) 也是当前研究的热点问题, 它是由电子经过的区域中靶原子电子的动态极化而产生的. 到目前为止, 韧致辐射谱中 PB 的贡献已在气体靶中得到证实^[11], 而在固体薄靶和厚靶的实验结果中均认为未观察到明显的 PB 贡献^[10,12,13], 但最近有学者^[14] 以放射源衰变出的 β 粒子碰撞固体厚靶产生韧致辐射, 并发现有极化韧致辐射的贡献, 其贡献随光子能量的增加而减少. 例如, 在⁹⁰Sr 源放射出的 β 粒子碰撞厚 Pb 靶产生的韧致辐射中, PB 的贡献从光子能量为 1 keV 时的 44% 减少至 31 keV 时的 1%^[14]. 因此, 电子碰

* 国家自然科学基金 (批准号: 11175123) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: anzhu@scu.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: zhujingjun@scu.edu.cn

撞固体靶产生的韧致辐射中是否含有PB的贡献有待进一步研究.

Monte Carlo (MC) 模拟是研究电子-光子输运的有效工具, PENELOPE 程序是目前广泛使用的模拟电子-光子输运的 Monte Carlo 程序, 它可模拟能量在 50 eV—1 GeV 范围内的电子-光子在任意材料中的输运过程. PENELOPE 程序计算韧致辐射时只包含有 Pratt 和 Kissel 等^[5-7]研究的OB的贡献^[15,16]. 多项研究结果^[1,16-18]显示, 20 keV 电子束垂直入射到不同厚靶(如 C, Si, Cu, Zr, Au)上, X 射线探测方向与电子束入射方向夹角为 130° 时, 实验结果与 PENELOPE 模拟结果存在一定差异, 这种差异随原子序数 Z 的增加而变大, 其中高 Z 元素 Au 的实验谱比理论谱高约 10%^[17]. Llovet 等^[17]认为, 这种差异可能由 Monte Carlo 算法中所采用的韧致辐射截面的精确度、背散射电子入射到探测器窗中所引起. 在 2009 年田丽霞等^[19]的研究中, 5—25 keV 电子束垂直入射, 束流方向与靶表面夹角为 45°, X 射线探测方向与束流方向夹角为 90°, 实验谱与 PENELOPE 模拟谱符合较好, 但在谱的低、高能端仍存在一定差异.

在核聚变反应堆中, W 是反应堆第一壁材料的主要候选材料, 氦原子及其离子的辐照会使 W 材料腐蚀、脆化, 氦在 W 中的渗透及滞留也会影响材料性能, 带来安全问题, 所以对氦在 W 材料中的含量及深度分布进行分析具有重要意义. 当采用 BIXS 技术进行氦分析时, 需要电子在 W 中产生的韧致辐射的精确理论谱; 另外, Au 元素是 Pratt 和 Kissel 等^[5-7]理论计算中的“benchmark”元素, 具有相对高的计算精度, 但 Llovet 等^[17]的结果中 Au 的韧致辐射实验谱和 PENELOPE 模拟谱仍存在差异. 基于以上原因, 我们改进了实验装置和数据处理方法, 选择 W($Z = 74$) 和 Au($Z = 79$) 两种元素作为靶材, 测量了 10—25 keV 电子碰撞厚 W 和 Au 靶产生的韧致辐射, 并与 PENELOPE 程序计算的韧致辐射谱进行比较.

2 实 验

2.1 实验装置

实验装置由 KYKY-2800B 型扫描电镜、硅漂移 X 射线探测器(SDD)、多道脉冲分析器、真空系统等组成^[20]. KYKY-2800B 型扫描电镜主要包括电子枪、电子透镜和靶室等, 10—25 keV 电子束由

电子透镜聚焦垂直入射, 扫描电子束斑的大小约为 2 mm × 2 mm. 表面经抛光处理的 W, Au 厚靶放置在法拉第筒内的靶架上, 其表面与水平方向成 45°. 入射电子数由精度约为 1% 的 ORTEC439 束流积分器测量. 电子与靶作用产生的 X 射线由硅漂移探测器(型号为 AMPTEK XR-100SDD)测量, 该探测器水平放置并朝向法拉第筒侧孔. 该 SDD 探测器对 ⁵⁵Fe 的 5.9 keV X 射线的能量分辨率(FWHM)为 125 eV, Si 灵敏层厚度为 0.5 mm, 窗面积为 20 mm², 探测器窗为超薄 C2 窗.

在本文中, 我们改进了实验所使用的法拉第筒. 新的法拉第筒选用 Cu 材取代之前的 Al 材, 壁厚为 5 mm, 可以有效阻止高能韧致辐射光子的穿透. 在法拉第筒顶部的上方放置了一个中心穿孔、厚度为 1 mm 的 Cu 片, 该 Cu 片与法拉第筒绝缘并接地, 可消除入射电子束散射引起的多余电子计数; 同时, 法拉第筒的顶孔和侧孔外都设置了 -100 V 的偏压以抑制能量小于 100 eV 电子的逃逸, 而能量大于 100 eV 电子的逃逸率通过 PENELOPE 模拟计算得出. 以上实验装置的改进使总入射电子数的测量更为准确. 另外, 为避免从法拉第筒侧孔逃逸出的背散射电子进入 SDD 探测器, 在探测器 C2 窗前放置了一片 7.05 μm 厚的高纯度 Al 膜, 其厚度是由卢瑟福背散射(RBS)方法测定的. 25 keV 电子在 Al 中的连续慢化近似(CSDA)射程为 6.39 μm, 该 Al 膜厚度超过了本文中最大能量电子在 Al 中的 CSDA 射程.

2.2 探测器效率刻度

探测器效率刻度在 X 射线定量分析中十分重要, 本文通过探测器的效率刻度来检验探测器内部几何参数的准确性. 实验上确定探测器效率的方法有多种, 如标准放射源法、利用离子束与物质相互作用产生的特征 X 射线、利用电子束与薄靶或厚靶相互作用产生的韧致辐射、利用电子储存环产生的同步辐射等^[21]. 本文采用标准放射源法对 SDD 探测器进行效率刻度, 测量韧致辐射和进行效率刻度的实验条件完全相同, 包括保持标准放射源表面与靶表面高度一致. 实验所用的 X 射线标准源 ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs, ⁵⁷Co 和 ⁵⁵Fe 由德国标准剂量机构 PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) 提供, 标准源的活度精确度为 1%—3% ($k = 2$). 实验采用了 ²⁴¹Am 源的 3.30, 11.89, 13.90, 17.81, 20.82 和 26.34 keV 射线全能峰, ¹³⁷Cs 源的 4.70, 32.10,

36.50 和 37.35 keV 射线全能峰, ^{57}Co 源的 6.40, 7.06 和 14.41 keV 射线全能峰, ^{55}Fe 源的 5.90 和 6.49 keV 射线全能峰. 除 ^{241}Am 源的 3.30 keV X 射线发射率取自 Gallagher 等 [22] 的文章外, 标准源的半衰期、射线能量以及发射率等参数均来源于国际原子能机构的评价数据 [23]. 图 1 为所得到的探测器效率刻度值.

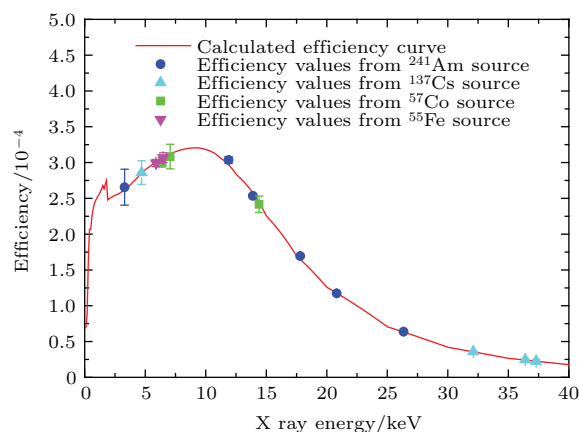


图 1 (网刊彩色) SDD 探测器的 X 射线探测效率 其中计算效率曲线是根据 (1) 式计算得到, 并归一到 ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{57}Co 和 ^{55}Fe 标准源的实验效率值; 探测器内部几何参数由厂商提供

Fig. 1. (color online) The X-ray detection efficiency of the SDD detector. The calculated efficiency curve is based on the model of Eq. (1) and normalized to the experimental efficiency data of ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{57}Co and ^{55}Fe standard sources. The detector's internal geometrical parameters are given by the detector manufacturer.

SDD 探测器的探测效率 $\varepsilon(E)$ 也可以用一个简单的模型来表示, 如 (1)–(4) 式所示 [19,20]:

$$\varepsilon(E) = cT(E)T_{\text{col}}(E)A(E), \quad (1)$$

其中, $T(E)$, $T_{\text{col}}(E)$, $A(E)$ 分别表示 X 射线穿过探测器各吸收层的透射率、X 射线穿过准直器(或超薄窗的支撑网格)的透射率以及 X 射线在探测器灵敏层中的吸收率, c 是常数. 它们可分别表示为

$$T(E) = \exp(-\mu_{\text{Si}_3\text{N}_4}x_{\text{Si}_3\text{N}_4} - \mu_{\text{Al}}x_{\text{Al}}), \quad (2)$$

$$T_{\text{col}}(E) = \eta \left[1 + \frac{1-\eta}{\eta} \exp(-\mu_{\text{grid}}x_{\text{grid}}) \right], \quad (3)$$

$$A(E) = 1 - \exp(-\tau_{\text{Si}}x_{\text{detector}}), \quad (4)$$

式中 $\mu_{\text{Si}_3\text{N}_4}$, μ_{Al} , μ_{grid} 分别表示 X 射线在 C2 窗的 Si_3N_4 层、Al 层、Si 支撑网格中的总质量衰减系数; $x_{\text{Si}_3\text{N}_4}$, x_{Al} , x_{grid} , x_{detector} 为 C2 窗的 Si_3N_4 层、Al 层、Si 支撑网格和探测器 Si 灵敏层的厚度; τ_{Si} 为 X 射线在 Si 灵敏层中的光电吸收质量衰减系数; η 表

示 C2 窗的 Si 支撑网格的开口面积与 C2 窗总面积之比. 厂商提供的探测器参数分别是: Si_3N_4 层厚度为 40 nm, Al 层厚度为 30 nm, Si 支撑网格的 η 值为 78%、厚度为 15 μm , Si 灵敏层厚度为 0.5 mm. 根据 (1) 式和以上参数计算出的 SDD 探测器的探测效率曲线如图 1 所示, 与实验效率值符合得很好, 表明厂商提供的探测器内部几何参数是可靠的. 在此计算中, 总质量衰减系数和光电吸收质量衰减系数取自于 PENELOPE 程序的数据库 [15,16]. 用此方法确定的效率刻度曲线在低能段 (~ 1 —5 keV) 的误差约为 10.0%, 在 高能段 (> 5 keV) 的误差小于 5%. 误差主要来自于使用标准源时的计数统计、标准放射源活度、X 射线发射概率、放射源表面覆盖层厚度等方面.

3 Monte Carlo 模拟

Monte Carlo 程序 PENELOPE(2008 版) 描述的电子与物质相互作用机制包括弹性散射、非弹性散射、内壳层电离和 EB 发射, 光子与物质相互作用的机制包括相干(瑞利)散射、非相干(康普顿)散射、光电效应和正负电子对效应. PENELOPE 不仅模拟初代粒子的输运, 也模拟其子代及其产物的输运. 该程序采用最可靠的相互作用物理模型, 这些计算模型在文献 [15, 16, 18] 中已有详细描述. 在 PENELOPE 程序中, 电子-光子在复杂材料结构中的输运由驱动程序 penmain 执行, 其产生的结果包括粒子在材料中的能量和角分布、粒子在各个体(body)中的能量沉积等. 为得到更具体的信息, 用户可定义 Impact 探测器和能量沉积探测器. Impact 探测器产生的输出能谱是从其他体中进入 Impact 探测器时的粒子的能量分布, 在定义该种探测器时, 可选择探测粒子的种类, 或者记录进入该探测器的所有种类粒子的信息. 选择能量沉积探测器时, 不能定义探测粒子的种类, 其产生的输出能谱是进入探测器灵敏体中所有粒子的能量沉积分布.

在本文的 PENELOPE 模拟中主要使用能量沉积探测器记录粒子的能量沉积信息, 且几何参数设置与实验一致. 由于韧致辐射的产生概率很低, 为了提高 PENELOPE 的模拟效率, 在模拟过程中采取了减小方差的措施, 即将 X 射线探测器对厚靶中心的半张角设为 30° . 比较半张角为 5° 和 30° 时模拟的 X 射线能谱, 发现二者没有差异. 在本文韧

致辐射谱模拟中, 法拉第筒是否存在对模拟结果没有影响.

在实验中, 法拉第筒用于收集入射电子束电荷. 入射电子碰撞厚靶后, 背散射电子和产生的二次电子由于受到筒内壁和厚靶的散射, 会从法拉第筒的顶孔和侧孔逃逸出去, 导致实际记录电子数偏低. 为了估计这部分影响, 我们使用PENELOPE程序计算了电子的逃逸率. 当入射能量为10—25 keV的电子碰撞厚W, Au靶时, 电子的逃逸率约为3.2%—3.6%, 该逃逸率将用于修正(5)式中的入射电子总数 N_0 .

4 结果与讨论

为考虑X射线探测器的响应, 对PENELOPE模拟谱进行了高斯分布函数的卷积(高斯函数半宽度为探测器能量分辨125 eV), 模拟谱和实验谱都转换成绝对强度单位(即一个入射电子在单位能量区间和单位立体角中所产生的光子数目), 以进行比较. 实验谱转换成绝对强度单位的计算公式如下:

$$N(E) = \frac{N_x}{N_0 \Delta\Omega \Delta E}, \quad (5)$$

其中, N_x 是X射线探测器在一定光子能量区间(道宽)记录到的X射线计数, N_0 为入射电子总数, $\Delta\Omega$ 为探测器所对应的立体角, ΔE 为能量道宽. 本实验中, ΔE 为30.93 eV/道, $\Delta\Omega$ 由探测效率曲线确定, 为 4.19×10^{-3} sr. 与以前的实验数据处理方法不同[17,19], 使用本文的方法处理实验数据, 实验谱不经过探测器本征效率直接反演, 避免了未考虑背散射电子与探测器窗相互作用而导致的误差. 文献[17, 19]处理实验数据的方法是在(5)式的基础上除以探测器的本征效率, 即将实验谱反演成进入探测器前的光子谱并转换成绝对强度单位, 再与同等条件下的PENELOPE程序模拟结果进行比较. 但背散射电子进入所使用的探测器窗中会产生光子, 文献[17, 19]方法没有考虑这一部分效应, 这会导致PENELOPE模拟计算结果偏低.

本文测量了10—25 keV能量电子碰撞厚W, Au靶产生的韧致辐射谱, 根据(5)式将该X射线实验谱转换成绝对强度单位, 其误差主要来源于计数统计误差(~1%)、入射电子数误差(~1%)和由探测器效率确定 $\Delta\Omega$ 的误差, 即在低能段(~1—5 keV)的误差约为10.1%, 在能段(> 5 keV)的误差小于5.2%.

图2和图3分别为10—25 keV电子碰撞厚Au和W靶产生的X射线实验谱与模拟谱的对比结果.

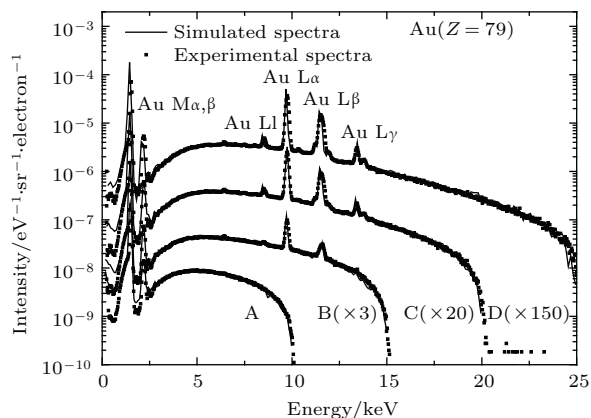


图2 由(A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25 keV电子碰撞厚Au靶产生的韧致辐射实验谱与PENELOPE模拟谱的对比. 点表示实验谱, 实线表示模拟谱; 为了实验谱和模拟谱的清晰对比, B, C, D分别乘以括号中的系数.

Fig. 2. Comparisons of the X-ray energy spectra produced by (A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25 keV electrons impact on the thick Au target with the simulation results using the PENELOPE code. The dots denote the measured spectra, and the solid lines indicate the simulation results. The curves of B, C, D have been shifted upward for clarity by multiplying factors indicated in the parentheses.

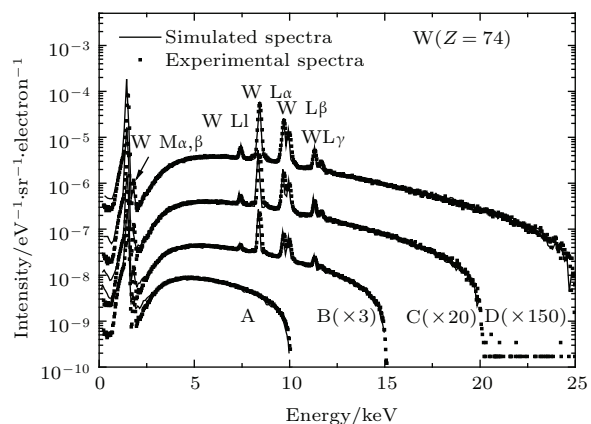


图3 由电子碰撞厚W靶的实验谱与模拟谱的对比(其余与图2一致)

Fig. 3. Same as in Fig. 2 except for the electron impact on the thick W target.

在图2所示的X射线谱中, 能量在2.12 keV左右对应Au的 $M\alpha, \beta$ 特征峰, 能量在9.7, 11.4, 13.4, 8.5 keV左右对应Au的 $L\alpha, L\beta, L\gamma, L\text{I}$ 特征峰. 由图可见, 实验谱与PENELOPE模拟谱符合很好, 但在低能区(< 3 keV), PENELOPE模拟谱略高于实验谱, 其原因是实验上虽然采用厚度超过电子CSDA射程的Al膜阻挡背散射电子, 但因电子的输运特性, 仍有极少量电子进入了探测器. 我

们采用PENENLOPE程序计算分析了此问题: 采用PENELOPE程序的Impact探测器, 可考察电子在能量沉积谱中的贡献, 计算结果如图4所示. 图4显示了Al膜后MC理论谱中光子和电子总贡献与光子贡献的对比, 可见当入射电子能量以及X射线能量越低时, 电子能量沉积的贡献就会越大; 在PENELOPE模拟中, 为了提高模拟效率, 我们将探测器半张角设置为 30° , 并将Al膜贴近探测器窗, 这会稍微高估电子的贡献, 并主要反映在能谱的前端(< 3 keV), 致使在该能量区域MC模拟谱略高于实验谱, 且入射电子能量越低时这种效应越显著.

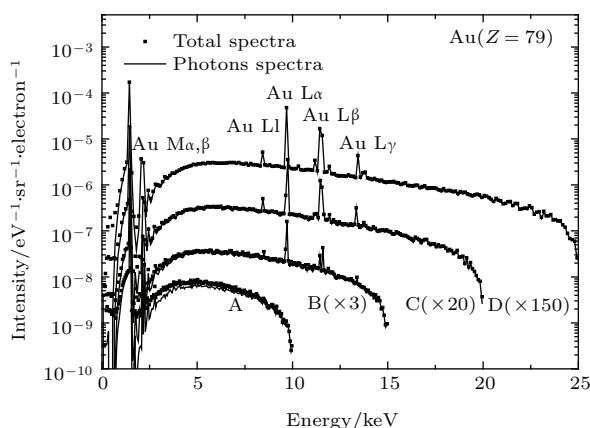


图4 PENELOPE模拟(A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25 keV电子碰撞Au靶产生的能量谱中光子和电子的总贡献与光子贡献的比较. 点表示光子和电子的总贡献谱, 实线表示光子的贡献谱; 为了清晰, B, C, D分别乘以括号中的系数.

Fig. 4. Comparisons of the total contributions of photons and electrons with the contribution of photons in the simulation results by using the PENELOPE code, where the energy spectra are produced by (A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25 keV electrons impact on the thick Au target. The dots denote the total contributions of photons and electrons, and the solid lines indicate the photons contribution. The curves of B, C, D have been shifted upward for clarity by multiplying factors indicated in the parentheses.

在图3所示的X射线谱中, 能量在1.78 keV左右对应W的 $M\alpha, \beta$ 特征峰, 能量在8.4, 9.7, 11.3, 7.38 keV左右对应W的 $L\alpha, L\beta, L\gamma, L\ell$ 特征峰. 与Au的情况相同, 除低能区外, 整体上实验谱与模拟谱符合得很好.

与文献[17, 19]的工作相比, 本文实验结果与MC理论结果符合得更好. 我们认为主要原因有两点: 一方面, 本次实验的数据处理方法与文献[17, 19]的方法不同, 避免了以前的方法没有考虑到背

散射电子与探测器Be窗的相互作用; 另一方面, 本次实验改进了法拉第筒的设计, 使入射电子电荷测量更为准确, 本次实验也使用了扫描电镜, 电子束聚焦效果较之前有了很大改善, 减少了杂散电子的影响. 本次实验选择的两种元素中, Au元素是韧致辐射理论截面数据的“benchmark”元素, 10—25 keV电子碰撞Au靶产生的韧致辐射实验谱与理论谱总体上符合很好, 对W元素, 韧致辐射实验谱与理论谱的符合情况与Au元素一致, 这表明了PENELOPE程序模拟韧致辐射谱的可靠性. 由于实验谱与普通韧致辐射谱总体上符合得很好, 因此可以认为在10—25 keV电子碰撞固体厚靶产生的韧致辐射中没有明显的极化韧致辐射的贡献.

5 结 论

本文改进了实验装置和数据处理方法, 测量了10—25 keV能量电子碰撞厚W, Au靶产生的韧致辐射谱, 将实验谱与PENELOPE模拟的X射线谱进行了比较, 结果表明, 除在小于3 keV的低能区实验谱略低于理论谱外, 两者之间符合得很好, 并讨论了低能区差异的原因. 我们认为, 只包含OB截面数据的PENELOPE程序能够很好地模拟电子与固体靶相互作用产生的韧致辐射谱, 也表明在电子碰撞固体靶产生的韧致辐射中没有明显的极化韧致辐射的贡献.

参考文献

- [1] Acosta E, Llovet X, Salvat F 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 3228
- [2] Matsuyama M, Watanabe K, Hasegawa K 1998 *Fusion Eng. Design* **39** 929
- [3] An Z, Hou Q, Long J J 2008 *Nucl. Instr. Meth. B* **266** 3643
- [4] Tseng H K, Pratt R H 1971 *Phys. Rev. A* **3** 100
- [5] Pratt R H, Tseng H K, Lee C M, Kissel L, MacCallum C, Riley M 1977 *At. Data Nucl. Data Tables* **20** 175
- [6] Pratt R H, Tseng H K, Lee C M, Kissel L, MacCallum C, Riley M 1981 *Erratum* **26** 477
- [7] Kissel L, Quarles C A, Pratt R H 1983 *At. Data Nucl. Data Tables* **28** 381
- [8] Seltzer S M, Berger M J 1985 *Nucl. Instr. Meth. B* **12** 95
- [9] Seltzer S M, Berger M J 1986 *At. Data Nucl. Data Tables* **35** 345
- [10] Shanker R 2006 *Radiat. Phys. Chem.* **75** 1176
- [11] Portillo S, Quarles C A 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 173201

- [12] Quarles C A, Portillo S 2006 *Radiat. Phys. Chem.* **75** 1187
- [13] Williams S, Quarles C A 2008 *Phys. Rev. A* **78** 062704
- [14] Amrit Singh, Dhaliwal A S 2016 *Radiat. Phys. Chem.* **119** 167
- [15] Salvat F, Fernández-Varea J M, Sempau J 2008 *PENELOPE-2008, A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport* (Issy-les-Moulineau: OECD/NEA Data Bank)
- [16] Salvat F, Fernández-Varea J M, Sempau J, Llovet X 2006 *Radiat. Phys. Chem.* **75** 1201
- [17] Llovet X, Sorbier L, Campos C S, Acosta E, Salvat F 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 3844
- [18] Acosta E, Llovet X, Coleoni E, Riveros J A, Salvat F 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 6038
- [19] Tian L X, Zhu J J, Liu M T, An Z 2009 *Nucl. Instr. Meth. B* **267** 3495
- [20] Zhao J L, Tian L X, Li X L, An Z, Zhu J J, Liu M T 2015 *Radiat. Phys. Chem.* **107** 47
- [21] An Z, Liu M T, Wu Y, Duan Y M 2006 *Atomic Energy Science and Technology* **40** 84 (in Chinese) [安竹, 刘慢天, 吴英, 段艳敏 2006 原子能科学技术 **40** 84]
- [22] Gallagher W J, Cipolla S J 1974 *Nucl. Instr. Meth.* **122** 405
- [23] Bé M M, Chisté V, Dulieu C 2005 *X-ray and Gamma-ray Decay Data: Standards for Detector Calibration and Other Applications* (Vienna: International Atomic Energy Agency) Available at http://www-nds.iaea.org/xgamma_standards/ [2016-3-18]

Bremsstrahlung spectra produced by 10–25 keV electron impact on thick W, Au targets*

Tan Wen-Jing An Zhu[†] Zhu Jing-Jun[‡] Zhao Jian-Ling Liu Man-Tian

(Key Laboratory of Radiation Physics and Technology of Ministry of Education, Institute of Nuclear Science and Technology,
Sichuan University, Chengdu 610064, China)

(Received 25 December 2015; revised manuscript received 19 March 2016)

Abstract

Bremsstrahlung emission produced by electron impact on thick or thin targets is one of the fundamental radiation processes, and the interest in its study continues to grow because of its importance for understanding the interaction of electrons with matter and also for many practical applications. Nowadays, there has been some disagreement concerning whether or not the polarization bremsstrahlung, which is emitted by the atomic electrons in a target polarized by the incident charged particles, contributes to the total bremsstrahlung when the incident electrons bombard a solid target. Some reports suggested that the polarization bremsstrahlung does not significantly contribute to the total bremsstrahlung in experiments involving solid targets. However, some recent experimental data indicated that a significant amount of polarization bremsstrahlung contributes to the total bremsstrahlung when electrons from β -decays of radioactive nuclei bombard solid targets. In other papers, the comparison between the bremsstrahlung spectra produced by electron impact on different thick solid targets from low- Z to high- Z elements and the simulation spectra of Monte Carlo code PENELOPE showed that there are certain discrepancies between the experimental and simulation results, and on the whole the factors required for the experimental results and simulation spectra to match with each other seem to increase slightly with the target atomic number increasing and for high- Z elements experimental results are about 10% higher than simulation results. PENELOPE is a general-purpose Monte Carlo code that simulates coupled electron-photon transportation, in which simulation for bremsstrahlung is only based on ordinary bremsstrahlung and any contribution from polarization bremsstrahlung is not included. Therefore, whether the discrepancies between the experimental and simulation spectra are caused by the polarization bremsstrahlung or by other reasons remains to be further studied. In this paper, we improve the Faraday cup to measure the incident electron charges more accurately. Meanwhile, a high-purity Al film of 7.05 μm thickness is placed in front of the ultra-thin window of the X-ray silicon drifted detector (SDD) to prevent the backscattered electrons that escape from the side hole of the Faraday cup entering into the SDD detector. The Al film thickness is measured by the method of Rutherford backscattering. In addition, we adopt a data processing method which is different from previous one, to take into account the interaction between backscattered electrons and the window of the SDD detector. New measurements of bremsstrahlung spectra generated by 10–25 keV electron impact, respectively, on thick targets of tungsten and gold are reported in this paper. The experimental data are compared with the simulation results of X-ray spectra obtained from the PENELOPE code, and they are in very good agreement except for the lower energy region (< 3 keV) where the experimental spectra are slightly lower than the simulation spectra. The reason for the small discrepancy for the lower energy region (< 3 keV) is also discussed. The results presented in this paper indicate that the X-ray spectra, which are produced by electron impact on solid targets, do not include obvious contribution of polarization bremsstrahlung, and the PENELOPE code can reliably describe the bremsstrahlung produced by electron impact on solid thick targets.

Keywords: electron impact, bremsstrahlung, Monte Carlo simulation

PACS: 34.80.-i, 78.70.-g, 02.70.Uu

DOI: 10.7498/aps.65.113401

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11175123).

[†] Corresponding author. E-mail: anzhu@scu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: zhujingjun@scu.edu.cn