

文章编号: 1007-4627(2016)01-0045-07

多种 β 射线阻挡层及X射线产额精度对BIXS技术的影响

黄郁旋¹, 毛莉², 丁伟², 安竹¹

(1. 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;

2. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 氚分析在聚变堆与核技术的研究中有着广泛的应用。BIXS技术(β 衰变诱发X射线谱技术)是一项无损的氚分析技术, 该技术的分析深度对于高原子序数的材料能达到100 μm , 对低原子序数的材料能达到1 mm。在BIXS技术中, 采用金属薄膜作为 β 射线阻挡层具有排除极化韧致辐射干扰、减少探测器信号堆积等优点。为了研究多种 β 射线阻挡层材料对BIXS技术的影响, 利用Monte Carlo方法PENELLOPE并行模拟程序分别模拟了采用Al、Au金属薄膜和Ar气作为 β 射线阻挡层的BIXS技术, 并使用GENEREG反演程序对模拟结果进行反演计算及比较。还讨论了韧致辐射与特征X射线产额计算精度、韧致辐射谱倾斜对BIXS技术的影响。研究表明Al金属薄膜最适合用作BIXS技术的 β 射线阻挡层。

关键词: BIXS技术; β 射线阻挡层; 特征X射线; 韧致辐射

中图分类号: TL81 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.33.01.045

1 引言

氚和氦被认为是理想的热核聚变堆燃料^[1], 在聚变堆运行期间, 其第一壁材料不可避免地暴露在原子和离子氚中, 造成一部分氚滞留在第一壁材料里^[2-3]。滞留的氚会使第一壁材料脆化, 并且影响聚变堆燃料系统及氚增殖系统的平衡^[4], 给聚变堆安全维护工作、燃料废物处理带来不少问题^[5]。因此, 对含氚材料进行氚分析获取材料中氚的含量及深度分布信息是核设施材料研究及退役处理中的重要工作^[6-7]。在核技术领域, 了解中子发生器靶材(如Ti等)中氚的含量及分布也甚为重要^[8-9]。所以氚分析在聚变堆与核技术的研究中具有重要的作用^[8]。由日本学者MATSUYAMA^[2]提出的 β 衰变诱发X射线谱技术(β -ray induced X-ray spectrometry, 即BIXS技术)是一项无损的氚分析技术, 该技术的原理是: 含氚材料中氚的 β 衰变会产生最大动能为18.6 keV的电子能谱, 这些电子与周围的含氚材料相互作用会产生原子内壳电离的特征X射线和韧致辐射, 通过测量产生的特征X射线和韧致辐射能谱, 并结合特征X射线和韧致辐射能谱的理论计算, 最后通过反演计算则可得含氚材料中氚的含量和深度分布信息^[2,5,10-13], 详细过程见本文第二节的叙述。BIXS技术有如下优

点^[10-11,13]: 可以实现在线及原位测量, 测量深度大, 在高原子序数的材料中可达到100 μm , 对于低原子序数的材料可达到1 mm^[9], 且对材料没有损伤。目前, 该技术已在JET^[14], EAST^[15]及ITER^[4,12,16]等相关实验研究中得到了应用。

早期的BIXS技术主要用来分析石墨样品^[2], 石墨的特征X射线能量较低不容易被探测到, 且石墨对 β 射线的阻止本领较低, 石墨样品表面的氚衰变放出的 β 射线很容易穿透样品而不能探测到 β 射线与石墨相互作用产生的X射线, 因此MATSUYAMA等^[2]提出采用Ar气作为 β 射线阻挡层^[2], 将样品表面穿透出来的 β 射线能量转化成探测器能够探测到的X射线。之后在用于分析钨、偏滤器、不锈钢等样品的BIXS技术中^[11,14,16-17], 也都采用Ar气作为 β 射线阻挡层。但是, 在我们的实际工作中发现采用Ar作为 β 射线阻挡层存在以下两方面的弊端: 一方面, 我们分析的含氚钛样品含氚量较高^[18], 因此当X射线探测器与靶的距离较近时(一般为5 mm^[2,17], 约为氚 β 衰变最大能量电子在Ar气中的射程), 造成X射线探测器死时间过大, 从而产生信号堆积, 但扩大探测器与样品之间的距离时, Ar气的厚度也随之增大, 导致Ar气对X射线尤其是低能端的X射线吸收比较强烈, 而低能端的X射

收稿日期: 2015-04-05; 修改日期: 2015-04-27

基金项目: 中国工程物理研究院资助项目; 国家自然科学基金资助项目(10674097, 11175123)

作者简介: 黄郁旋(1988-), 女(壮族), 广西百色人, 硕士研究生, 从事核能与核技术工程研究, E-mail: yixuan1935@163.com。

通信作者: 安竹, E-mail: anzhu@scu.edu.cn。

线对于 BIXS 技术的分析又非常重要；另一方面，我们研究小组长期开展了电子与原子碰撞的研究工作，注意到 β 射线与气体 (Ar, Kr, Xe) 相互作用会产生极化韧致辐射^[19-20]，但是目前对极化韧致辐射的研究尚未成熟，Monte Carlo (MC) 模拟程序中没有考虑极化韧致辐射的贡献，只包含了常规韧致辐射的贡献，所以在目前的情况下，极化韧致辐射会影响 BIXS 技术实验结果的分析。

为了克服采用 Ar 作为 β 射线阻挡层时存在的问题，本文首次提出在真空条件下采用金属薄膜代替 Ar 气作为 BIXS 技术的 β 射线阻挡层。目前的研究表明，只在 β 射线与气体的相互作用中观察到了显著的极化韧致辐射，而在 β 射线与金属等固体靶相互作用中没有观察到明显的极化韧致辐射^[19]，因此在真空条件下采用金属薄膜作为 β 射线阻挡层可排除极化韧致辐射的干扰，并且能够自由调节探测器与靶的距离。然而金属薄膜对 X 射线的吸收不同于 Ar 气，图 1 给出了 Al, Ar, Au 对 X 射线的吸收特性，即 Al, Ar, Au 的 X 射线质量吸收系数与 18.6 keV 的电子在各材料中射程的乘积 (氡 β 衰变最大电子能量为 18.6 keV) 随 X 射线能量的变化关系。由图 1 可见，Au 对 X 射线的吸收能力高于 Al 和 Ar，并且不同的材料在不同的能量范围对 X 射线的吸收能力是不同的，因此需要研究不同 β 射线阻挡层对 BIXS 技术的影响。本文使用基于 MC 方法的 PENELOPE 并行程序^[21]对分别采用 Al, Au 膜及 Ar 气作为 β 射线阻挡层的 BIXS 技术进行了模拟研究，并结合正则化反演讨论了 X 射线产额计算精度与韧致辐射谱倾斜对 BIXS 技术的影响。

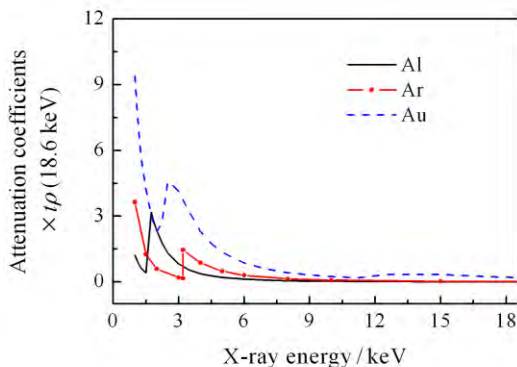


图 1 (在线彩图) Al, Ar, Au 材料中的 X 射线质量吸收系数与 18.6 keV 电子在该材料中射程的乘积随 X 射线能量的变化关系

2 研究方法

本文建立了 3 种 BIXS 技术模拟模型，分别采用 Al

膜、Au 膜、Ar 气作为 β 射线阻挡层，简称 Al, Au, Ar 模型。Al 和 Au 分别代表了低原子序数和高原子序数的金属材料，Al 膜的厚度为 3.8228 μm ，Au 膜的厚度为 1.0468 μm ，Ar 气体的厚度为 6.8644 mm，各 β 射线阻挡层的厚度是能量为 18.6 keV 的电子在各阻挡层材料中的最大射程，旨在将样品表面的氡衰变放出的 β 射线能量完全转化成为 X 射线。X 射线探测器为半导体 X 射线探测器，模拟模型的参数设置如下：X 射线探测器半径为 5 mm，Si 晶体厚度 5 mm，Si 死层厚度 0.1 μm ，Au 接触层厚度 20 nm，Be 窗厚度为 12.7 μm ，其中 Si 晶体与 Si 死层及 Au 接触层为一个整体，Si 晶体距 Be 窗 5 mm，二者中间为真空；靶为镀在 1 mm 钼基底上的 5 μm 厚的 TiT 样品，其半径为 9 mm，X 射线探测器距靶 6.8644 mm (即 Ar 气的厚度)。Al 或 Au 模型的 BIXS 技术模拟示意图如图 2 所示，探测器与靶之间为真空；在 Ar 模型中，探测器与靶之间充满 Ar 气。

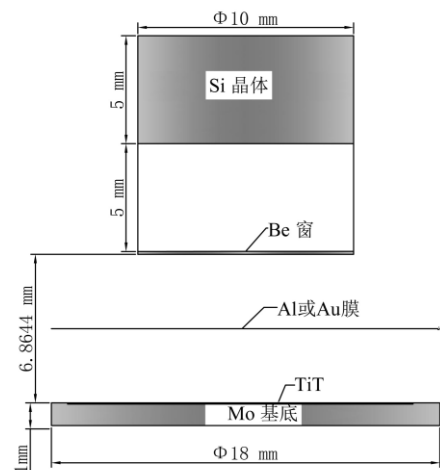


图 2 BIXS 技术模拟模型示意图

在 MC 模拟中，将 TiT 样品分成 10 层，每层厚度为 0.5 μm ，每层内部的氡都设为均匀分布。在 BIXS 技术中，由探测器测得的 X 射线能谱 $S(E)$ 表示如下^[22]：

$$S(E) = \sum_{i=1}^M a_i f_i(E), \quad (1)$$

其中： $f_i(E)$ 是当样品中只有第 i 层含有氡元素时的 X 射线能谱； a_i 表示第 i 层的氡含量； M 为 10。 $f_i(E)$ 可按照实际的实验条件采用基于 MC 方法的 PENELOPE 并行程序 (注：由 SALVAT 等^[21]开发的 PENELOPE 程序为串行程序，为提升计算速度，我们基于 MPI 实现了 PENELOPE 程序的并行化^[23]) 模拟计算得到，在 MC 模拟时，初级电子的能量由基于费米 β 衰变理论的氡 β 衰变电子能谱抽样得到^[8]。图 3 给出了 MC 模

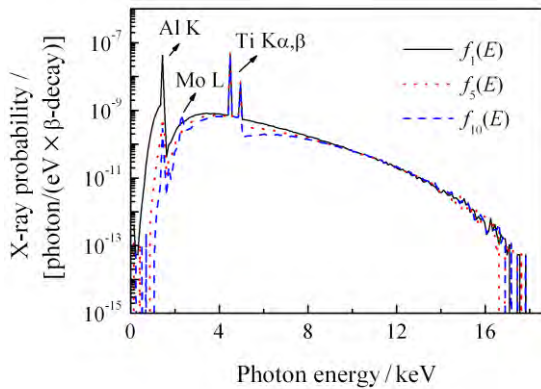


图 3 (在线彩图)MC方法模拟计算得到的Al模型的 $f_1(E)$, $f_5(E)$ 和 $f_{10}(E)$

拟计算得到的Al模型的 $f_1(E)$ 、 $f_5(E)$ 和 $f_{10}(E)$ 。通过BIXS技术实验测量的 $S(E)$ 和模拟得出的 $f_i(E)$ ，可反演得到 a_i ，即测得的氡分布。在计算过程中，对模拟得到的 $f_i(E)$ 进行了高斯卷积，高斯卷积函数的半高宽(FWHM)为探测器的能量分辨，设为180 eV。为了讨论样品中不同氡分布的情况，本文假设了4种系列的 a_i ，分别代表4种典型的氡分布，即高斯分布、均匀分布、递减和递增分布，利用MC模拟计算得到的 $f_i(E)$ 以及假设的一系列 a_i 值可构造出模拟的 $S(E)$ 。由于在实际实验中，各个X射线能量点的计数不同，所以各个能量点计数的统计误差也不同，为了反映实验谱的统计特性，模拟的 $S(E)$ 谱附加了高斯统计涨落，方法如下：设置模拟 $S(E)$ 谱中能量点6.5 keV处计数的统计误差为3%(6.5 keV能量点前后光子计数较多且X射线谱较为平滑，并且在合理的实验测量时间内X射线谱的统计误差容易达到3%^[5,11-12])，则其它能量点计数的统计误差由如下式(2)计算，

$$v = \sqrt{\frac{N_{6.5}}{N}} \times 3\% \quad (2)$$

式(2)中 $N_{6.5}$ 为6.5 keV能量点处的计数， N 为其它能量点的计数。图4给出了3种模型在氡均匀分布情况下构造出的模拟 $S(E)$ 谱。这样，就可以利用由MC方法获得的模拟 $S(E)$ 和 $f_i(E)$ 来反演出相应的 a'_i ，通过与假设的氡分布 a_i 的比较，即可开展本文的有关研究。然而方程(1)通常是离散的病态方程(相应问题称为不适定问题)，即 $f_i(E)$ 对应的矩阵的条件数很大， a'_i 对 $S(E)$ 的微扰尤其敏感，因此在反演过程中应使用相应的正则化方法来处理该问题^[24-25]。

Tikhonov正则化方法是常用的正则化算法，GENEREG程序是基于Tikhonov正则化方法的反演程序，该程序采用自洽算法来确定正则参数，能对不适

定问题进行非负约束和光滑约束，求得不适定问题的最优解^[25]。LONG等^[26]的研究表明，使用GENEREG程序对BIXS技术进行反演计算时，其效果比较理想，所以本文使用GENEREG程序进行BIXS技术实验模拟的反演分析。

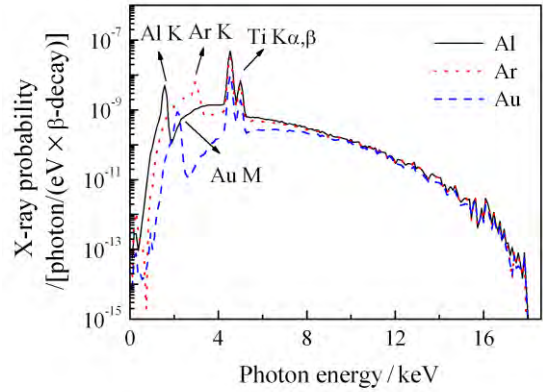


图 4 (在线彩图)氡均匀分布时3种模型的模拟 $S(E)$ 谱 6.5 keV处计数的统计误差设为3%，其他能量点计数的统计误差由式(2)计算得出。

3 结果与讨论

近年来，我们研究小组开展了BIXS技术的有关研究^[3,8,22-23,26-27]，如反演方法^[22,26]、几何参数(X射线探测器与靶的距离)^[23]、内韧致辐射及样品表面粗糙度^[8]、特征X射线产额精度^[27]等因素对BIXS技术分析结果的影响。但多种β射线阻挡层、韧致辐射产额计算精度、韧致辐射谱倾斜这3种因素对测量结果的影响尚未开展。本节基于MC模拟与正则化反演计算^[25]，详细地分析多种β射线阻挡层、X射线产额计算误差、韧致辐射谱倾斜对BIXS技术的影响。

3.1 多种β射线阻挡层对BIXS技术的影响

图5给出了采用Al膜、Ar气、Au膜作为β射线阻挡层的3种模型在氡分布为高斯分布、均匀分布、递减分布、递增分布时的反演结果。

从图5中可观察到，3种模型的反演结果与假设的氡分布均存在偏差。高斯分布时的偏差比较明显，非高斯分布时的偏差则要小一些。为了量化反演结果与假设氡分布的偏差，本文定义 δ 为反演误差，其计算公式为

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^M |a'_i - a_i|}{\sum_{i=1}^M a_i} \quad (3)$$

式中 a'_i 和 a_i 分别表示氡分布的反演结果和假设的氡分布^[21]。表1给出了Al, Ar, Au 3种模型的反演误差。

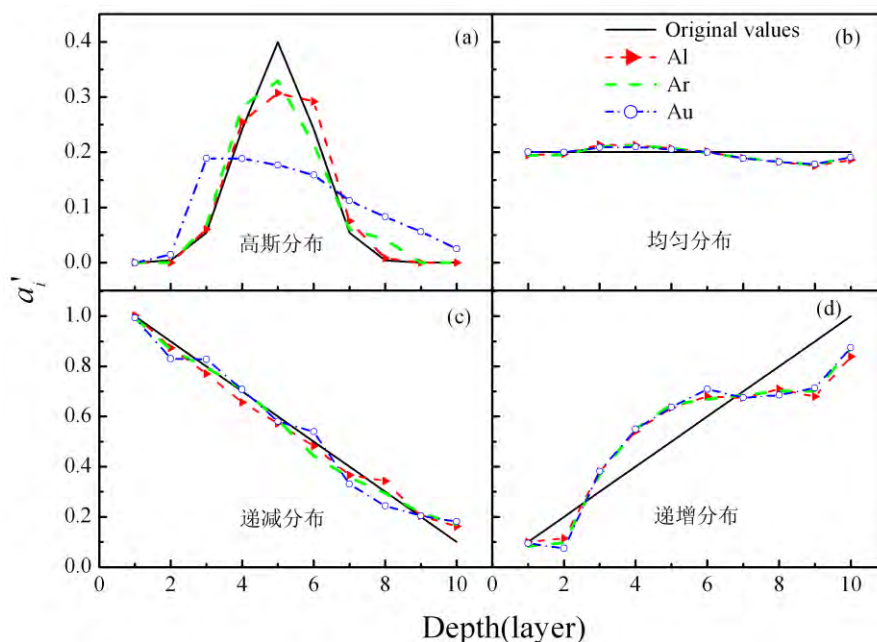


图 5 (在线彩图) Al, Ar与Au 3种模型在氙高斯分布、均匀分布、递减分布、递增分布时的反演结果 a_i'

表 1 Al, Ar, Au 3种模型的反演误差

单位: %

β 射线阻挡层	高斯分布	递减分布	均匀分布	递增分布
Al	19.1	5.30	5.40	18.6
Ar	19.9	4.70	4.90	18.1
Au	72.3	7.00	4.10	19.3

分析表1的数据可知, Al和Ar模型的 δ 值比较接近, 两者在递减分布与均匀分布时的反演误差为 $\sim 5\%$, 高斯分布与递增分布的反演误差偏大, 为 $\sim 19\%$; Au模型的 δ 值在递减分布与递增分布时略大于Al和Ar模型, 均匀分布时与Al和Ar模型相当, 但是在高斯分布时的 δ 值为72.3%, 远远偏离了假设的氙分布。从以上结果可见, 3种模型在高斯分布时的反演误差均比非高斯分布时大, 其原因可能是GENEREG程序使用平滑约束进行反演^[25], 对于假设的氙分布是平滑分布时, 其解的误差较小, 而当假设的氙分布有阶跃时, 其解的误差比较大, 而我们假设的氙的高斯分布近似处于阶跃的分布状态, 靶中的氙几乎处在含氙样品的中心, 因此反演计算所得氙分布的误差比非高斯分布时的反演误差大。总的来看, Al和Ar模型的反演结果优于Au模型的反演结果, 这与Au对低能X射线的吸收较强有关; 氙平滑分布时的反演结果优于高斯分布时的反演结果。

3.2 X射线产额计算精度对BIXS技术的影响

电子与物质相互作用产生的X射线能谱包含韧致辐射及特征X射线, 所以在使用MC方法模拟计算 $f_i(E)$ 时, $f_i(E)$ 的精度与韧致辐射和特征X射线

产额两者的计算精度有关。因此本小节研究了韧致辐射和特征X射线产额计算精度对BIXS技术的影响。SELTZER和BERGER^[28]的工作表明, 当入射电子能量低于2 MeV时, 理论计算的电子与物质相互作用韧致辐射截面的误差约为10%, PENLOEPE程序中的韧致辐射截面正是使用SELTZER和BERGER的理论计算的截面数据, 这意味着在BIXS技术中, 韧致辐射产额的计算误差为10%左右。另外, BOTE等^[29]和LI等^[27]的研究指出, 基于扭曲波波恩近似(DWBA)理论计算的电子原子碰撞内壳层电离截面在PENLOEPE程序中用来计算特征X射线产额时, 特征X射线产额的实验值和理论值存在约10%的误差。基于以上研究结果, 在本节的研究中我们将韧致辐射和特征X射线产额计算精度都设为10%。

首先, 本文利用MC方法模拟计算得到的 $f_i(E)$ ($f_i(E)$ 已经过高斯卷积)与假设的4种氙分布 a_i 得到了 $S(E)$ 谱, 此时的 $S(E)$ 谱不考虑X射线产额计算精度, 但其计数附加了式(2)的统计涨落。接着, 在PENLOEPE并行程序计算所得到的相空间文件中, 分别将韧致辐射谱和特征X射线谱提取出来并附加 $\pm 10\%$ 的误差, 构造出X射线产额含有误差的 $f_i(E)'$, 然后对

方程(4)进行反演计算, 求出X射线产额含有误差时的氡分布 a_i'' ,

$$SE = \sum_{i=1}^M a_i'' f_i(E)'. \quad (4)$$

为了与没有考虑 X 射线产额计算精度时的情况相比较, 当考虑 X 射线产额精度时, 设其反演误差用额外反演误差 δ' 来表示, 其计算公式如下:

$$\delta' = \frac{\sum_{i=1}^M |a_i'' - a_i'|}{\sum_{i=1}^M a_i'}. \quad (5)$$

图 6 给出了 Al、Ar、Au 3 种模型在考虑 X 射线产额计算精度时的额外反演误差。由图 6 可见, 在考虑 X 射线, 三种模型的 δ' 的值都大于 10%。在氡非高斯分布时, Al 和 Ar 模型的 δ' 值较小且波动不大, 反观 Au 模型在递减分布时 δ' 值较小且波动不大外, 其在均匀分布和递增分布时波动较大。在氡高斯分布时, Al 模型的 δ' 值小于其它模型, Ar 模型和 Au 模型的 δ' 值较大且波动剧烈, 其中 Au 模型的最小的 δ' 值为 $\sim 130\%$ 。研究表明, 当考虑 X 射线产额计算精度时, Au 已完全不适用于作为 BIXS 技术的 β 射线阻挡层, Al 则是比较理想的 β 射线阻挡层。

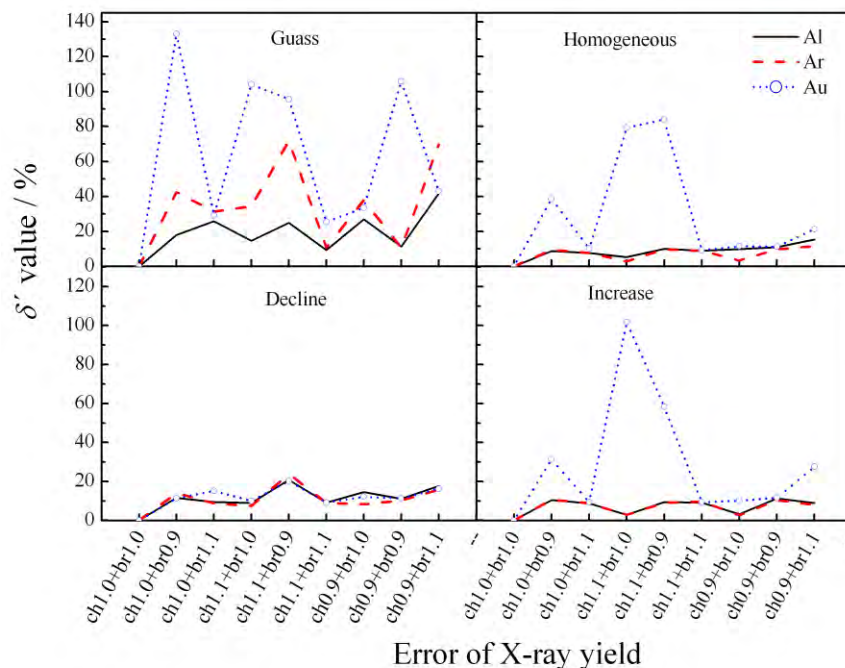


图 6 (在线彩图) 考虑 X 射线产额计算精度时的 Al, Ar, Au 3 种模型的额外反演误差

其中 X 轴参数 ch 表示特征 X 射线, br 表示韧致辐射, ch1.1+br0.9 表示特征 X 射线产额含有 +10% 的误差, 韧致辐射产额含有 -10% 的误差, 其余形式依此类推。

3.3 韧致辐射谱倾斜对 BIXS 技术的影响

在以前我们研究小组开展的电子碰撞厚靶产生韧致辐射的实验研究中^[20], 观察到低能区的实验韧致辐射谱与模拟的韧致辐射谱存在符合欠佳的现象, 其原因可能是 PENELOPE 程序使用的低能区韧致辐射截面被低估, 造成低能区的实验韧致辐射谱高于模拟的韧致辐射谱。为了讨论这一情况对 BIXS 技术的影响, 本节中, 将 4 种氡分布的模拟 $S(E)$ 谱分别乘以倾斜直线 $f_{0.05}$ 与 $f_{0.10}$, 其中 $f_{0.05} = -2.760 \times 10^{-6}x + 1.05$, $f_{0.10} = -5.376 \times 10^{-6}x + 1.10$, x 为 $0 \sim 18.6$ keV 间的 X 射线谱能量。以 $f_{0.05}$ 为例, 当 x 为 0 eV 时, $f_{0.05} = 1.05$,

当 x 为 18.6 keV 时, $f_{0.05} = 1.0$, 故 $f_{0.05}$ 是一条值从 1.05 到 1.0 的下降直线, 因而 $S(E)$ 谱乘以 $f_{0.05}$ 后, 低能区的 X 射线计数被抬高, 即韧致辐射谱倾斜了 5%, 同理, $S(E)$ 谱乘以 $f_{0.10}$ 后表示韧致辐射谱倾斜了 10%。表 2~4 给出了 Al, Ar, Au 模型在韧致辐射谱无倾斜与有倾斜时的反演误差比较。

表 2~4 的数据表明, 当韧致辐射谱倾斜时, Al 模型的 δ 随着倾斜程度的增大而增大, Ar 与 Au 模型的 δ 除了高斯分布在倾斜 5% 时出现降低外, 其它分布的 δ 值也是随着倾斜程度的增大而增大。总体而言, 当韧致辐射谱倾斜时, 3 种模型受影响的程度相当, 但总体上 Au 模型的反演误差要大于 Al 和 Ar 模型。

表 2 韧致辐射谱倾斜时 Al 模型的反演误差

单位: %

倾斜度	高斯分布	递减分布	均匀分布	递增分布
无倾斜	19.1	5.30	5.40	18.6
倾斜5%	23.7	10.9	9.20	18.5
倾斜10%	34.3	11.6	9.60	20.3

表 3 韧致辐射谱倾斜时 Ar 模型的反演误差

单位: %

倾斜度	高斯分布	递减分布	均匀分布	递增分布
无倾斜	19.9	4.70	4.90	18.1
倾斜5%	9.80	7.20	6.10	20.7
倾斜10%	29.4	16.5	8.40	24.4

表 4 韧致辐射谱倾斜时 Au 模型的反演误差

单位: %

倾斜度	高斯分布	递减分布	均匀分布	递增分布
无倾斜	72.3	7.00	4.10	19.3
倾斜5%	93.0	9.60	6.70	20.9
倾斜10%	86.2	29.4	9.20	23.9

以上研究均是假设 3 种模型在 X 射线谱 6.5 keV 处计数的统计误差是相同的情况, 此时它们对应 BIXS 技术实验的测量时间不同。若考虑 BIXS 技术实验测量时间相同的情况, 则氦衰变放出的 β 射线的粒子数相同, 从而 β 射线与样品相互作用产生的 X 射线强度也相同, 但由于不同 β 射线阻挡层材料对 X 射线的吸收

特性不同, 导致 Al, Ar, Au 3 种模型的统计误差也不同。假设 Ar 模型在 X 射线谱 6.5 keV 处计数的统计误差为 3%, 经过计算, 在 BIXS 技术实验测量时间相同时, Al 和 Au 模型在 X 射线谱 6.5 keV 处计数的统计误差分别为 2.8% 和 3.8%, 此时 Al, Ar, Au 3 种模型的反演误差见表 5。

表 5 实际测量时间相同时, Al, Ar, Au 3 种模型的反演误差比较

单位: %

β 射线阻挡层	高斯分布	递减分布	均匀分布	递增分布
Al	18.9	5.20	5.30	16.8
Ar	19.9	4.70	4.90	18.1
Au	74.0	7.20	4.60	20.7

由表 5 的数据分析得知, 总体来看, 当 BIXS 实验测量时间相同时, Al 模型和 Ar 模型的反演误差相当, Au 模型的反演误差最大(均匀分布除外), 若 Au 模型要达到与 Al 和 Ar 模型一样的统计误差, 则需要花费更多的测量时间以获得更好的计数统计。

到的影响程度相当, 但总体上 Au 模型的反演误差要大于 Al 和 Ar 模型。

4 结论

β 射线阻挡层是 BIXS 技术重要的组成部分, 选取合适的 β 射线阻挡层对于 BIXS 技术至关重要。研究表明:

综上所述, 我们认为, 在 Al, Ar, Au 3 种材料中, Al 是 BIXS 技术最理想的 β 射线阻挡层, 原因如下: 首先, Al 的原子序数较低 ($Z = 13$), 对 X 射线尤其是低能 X 射线的吸收没有高原子序数的 Au 强烈; 其次, 与采用 Ar 气作为 β 射线阻挡层时相比, 采用 Al 作为 β 射线阻挡层不仅能排除韧致辐射的干扰, 还能自由调节探测器与靶的距离; 最为重要的是, 当考虑 X 射线产额计算精度和韧致辐射谱倾斜的情况时, BIXS 技术受到的影响较小。

(1) 在 BIXS 技术模拟模型中, 在不考虑 X 射线产额计算精度与韧致辐射谱倾斜的情况下, Au 模型的反演误差最大, Al 和 Ar 模型的反演误差相近;

参考文献:

(2) 当考虑 X 射线产额计算精度的情况时, Au 模型受到的影响最大, Al 模型受到的影响最小;

(3) 当考虑韧致辐射谱倾斜的情况时, 3 种模型受

[1] WILLMS R, KOBAYASHI K, IWAI Y, *et al.* Fusion engineering and design, 2002, **61**: 575.
 [2] MATSUYAMA M, TANABE T, NODA N, *et al.* Journal of nuclear materials, 2001, **290**: 437.

- [3] MAO Li, CHEN Hao, SUN Hongwei, *et al.* Nuclear Physics Review, 2014, **31**(3): 391.
- [4] RLLIG M, PRIESTER F, BABUTZKA M, *et al.* Fusion Engineering and Design, 2013, **88**: 1263.
- [5] MATSUYAMA M, UEDA S, WATANABE K. Fusion engineering and design, 2000, **49**: 885.
- [6] PEREVEZENTSEV A N, BELL A C, RIVKIS L A, *et al.* Journal of Nuclear Materials, 2008, **372**: 263.
- [7] GLUGLA M, ANTIPENKOV A, BELOGLAZOV S, *et al.* Fusion Engineering and Design, 2007, **82**: 472.
- [8] MAO L, AN Z, LIANG J H, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2011, **269**: 105.
- [9] WU Y, HURLEY J P, JI Q, *et al.* Review of Scientific Instruments, 2010, **81**: 02B908.
- [10] MATSUYAMA M, WATANABE K, HASEGAWA K. Fusion Engineering and Design, 1998, **39**: 929.
- [11] MATSUYAMA M, BEKRIS N, GLUGLA M, *et al.* Journal of Nuclear Materials, 2003, **313**: 491.
- [12] MATSUYAMA M, TORIKAI Y, BEKRIS N, *et al.* Fusion Engineering and Design, 2006, **81**: 163.
- [13] MATSUYAMA M, TORIKAI Y, HARA M, *et al.* Nuclear Fusion, 2007, **47**: S464.
- [14] TORIKAI Y, MATSUYAMA M, BEKRIS N, *et al.* Journal of Nuclear Materials, 2005, **337-339**: 575.
- [15] WU J, YANG Z, LI Q, *et al.* Journal of Nuclear Materials, 2011, **417**: 576.
- [16] TORIKAI Y, MURATA D, PENZHORN R D, *et al.* Journal of Nuclear Materials, 2007, **363-365**: 462.
- [17] MATSUYAMA M, MURAI T, YOSHIDA K, *et al.* Journal of nuclear materials, 2002, **307**: 729.
- [18] ZHANG W G, SUN H W, ZENG F Y, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2012, **275**: 20.
- [19] PORTILLO S, QUARLES C A. Physical Review Letters, 2003, 91.
- [20] TIAN L, ZHU J, LIU M, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2009, **267**: 3495.
- [21] SALVAT F, FERNÁNDEZ-VAREA J M, SEMPANU J, PENELOPE-2008, A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport, OECD/NEA Data Bank, Issy-les-Moulineau, France, 2008.
- [22] AN Z, HOU Q, LONG J. Nucl Instr and Meth B, 2008, **266**: 3643.
- [23] MAO L, AN Z, WU Q Q, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2012, **289**: 52.
- [24] HANSEN P C. Numerical algorithms, 1994, **6**: 1.
- [25] ROTHS T, MARTH M, WEESE J, *et al.* Computer Physics Communications, 2001, **139**: 279.
- [26] LONG J, AN Z. Nucl Instr and Meth B, 2009, **267**: 1852.
- [27] LI X L, ZHAO J L, TIAN L X, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2014, **333**: 106.
- [28] SELTZER S M, BERGER M J. Atomic Data and Nuclear Data tables, 1986, **35**: 345.
- [29] BOTE D, LLOVET X, SALVAT F. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, **41**: 105304.

Effect of Several β -ray Stopping Layers and Uncertainty of X-ray Yields on the BIXS Method

HUANG Yuxuan¹, MAO Li², DING Wei², AN Zhu¹

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

2. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: Tritium analysis has an extensive application in the study of fusion reactor and nuclear technology. β -decay induced X-ray spectroscopy (BIXS) is a nondestructive tritium analysis technique, and it can detect deeper tritium distributions (~ 0.1 mm and ~ 1 mm for high- Z materials and low- Z materials, respectively). In the BIXS method, a metal film as β -ray stopping layer has advantages of eliminating the interference of polarizational bremsstrahlung and reducing the detector's signal pile-up. In order to study the effect of several β -ray stopping layers on the BIXS method, we use the Monte Carlo code PENELOPE to simulate the BIXS experiments using Al, Au metal films and Ar gas as the β -ray stopping layers, and then use the regularization method to calculate and compare the results. In this paper, we also discuss the effects of accuracy of X-ray yield and bremsstrahlung spectrum incline on the BIXS method. The study in this paper indicates that the Al film is the best β -ray stopping layer in the BIXS method.

Key words: BIXS; β -ray stopping layer; characteristic X-ray; bremsstrahlung

Received date: 05 Apr. 2015; **Revised date:** 27 Apr. 2015

Foundation item: China Academy of Engineering Physics Foundation; National Natural Science Foundation of China(10674097, 11175123)

Corresponding author: AN Zhu, E-mail: anzhu@scu.edu.cn.