

# 溅射铀靶中铀含量的放射性活度测量方法研究

郑健宁, 陈细林, 张昕宇, 徐利军, 夏文, 姚顺和, 罗明杰, 朱亨  
(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

**摘要:**为解决传统测量方法的局限性,本研究开发一种无损测量超薄碳纳米管膜铀靶厚度的“等效厚度测量技术”。采用磁控溅射法在碳纳米管膜和不锈钢基材上制备铀靶,利用 $2\pi\alpha$ 、 $2\pi\beta$ 多丝正比计数器测量铀靶表面发射率并转换为质量厚度,同时使用液体闪烁计数器进行对比验证。实验结果表明,该方法测量的铀靶厚度与液体闪烁计数器的最大偏差仅为-4.8%,验证该技术可行性;通过不同位置样品的测量证实溅射过程中铀分布的均匀性。以上结果表明,本研究方法能够精确测定超薄铀靶厚度,可为相关领域的铀靶制备和质量控制提供技术支持。

**关键词:**无损测量;质量厚度;碳纳米管膜铀靶

**中图分类号:** TB98      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-7512(2025)03-0261-08

**doi:** [10.7538/tws.2025.youxian.007](https://doi.org/10.7538/tws.2025.youxian.007)

## Research on the Measurement Method of Uranium Content and Radioactive Activity in Sputtered Uranium Targets

ZHENG Jianning, CHEN Xilin, ZHANG Xinyu, XU Lijun, XIA Wen, YAO Shunhe,  
LUO Mingjie, ZHU Heng  
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** To develop an "equivalent thickness measurement technique" for non-destructive measurement of ultra-thin carbon nanotube film uranium target thickness, which can address the limitations of traditional measurement methods. The magnetron sputtering was used to prepare uranium targets on carbon nanotube films and stainless steel substrates. The surface emissivity of the uranium target was measured and converted into mass thickness using  $2\pi\alpha$  and  $2\pi\beta$  multi wire proportional counters, and compared and verified using a liquid scintillation counter. The experimental results show that the maximum deviation between the uranium target thickness measured by this method and the liquid scintillation counter is only -4.8%, which verifies the reliability of this technology; The measurement of samples at different positions also confirmed the uniformity of uranium distribution during the sputtering process. This study successfully established a new non-destructive measurement method that can accurately measure the thickness of ultra-thin uranium targets, providing an effective technical means for uranium target preparation and quality control in related fields.

**Key words:** nondestructive measurement; mass thickness; Carbon nanotube film uranium target

铀元素中子核反应研究在核数据测量方面有特殊需求<sup>[1-2]</sup>,对于开展铀元素中子核反应研究所需的超薄铀靶,其质量厚度一般要求在100~200  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ,因此需要对制得的铀靶样品进行靶厚度的无损测量。

目前国内外有一些关于铀靶性能分析的报道,如 Berbil-Bautista 等<sup>[3]</sup>和于震等<sup>[4]</sup>分别开展了金属铀靶的制备工作,并分别使用扫描隧道显微镜(STM)、X 射线衍射(XRD)、俄歇电子能谱(AES)和 X 射线光电子能谱(XPS)等非放射性测量方法对制备的铀靶进行表征研究。然而,这些研究并未直观地给出靶物质的质量和铀靶的厚度信息。此外,由于铀层中可能含有杂质,对铀靶厚度与靶物质质量的精确测量需要借助其他测量技术进行细化。基于以上现状,本研究考虑采用放射性测量方法,直接获取铀靶的质量厚度信息。

本研究拟采用磁控溅射法制备超薄铀靶,并选择质量厚度在  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  量级的碳纳米管膜作为靶基材。然而,由于碳纳米管膜机械强度较低且粘附性较强,直接对其进行测量容易损坏铀靶样品,同时也可能因样品黏附测量设备而造成污染。为此,本研究采用碳纳米管膜与不锈钢组成的组合基片作为靶基材。在溅射完成后,通过使用  $2\pi\alpha$ 、 $2\pi\beta$  多丝正比计数器直接测量不锈钢基片上的铀表面发射率,并将其换算为质量厚度。可作为碳纳米管膜上铀的质量厚度,实现对超薄铀靶的间接无损测量。

## 1 铀靶制备

制靶与测量的流程示于图 1。磁控溅射是一种真空镀膜技术,由于正交电磁场的存在,溅射时产生的高能电子不会对基片造成较大的损伤<sup>[5-6]</sup>,因此适合制作本研究使用的超薄碳纳米管膜基片。为了实现对超薄铀靶的间接无损测量,开发了一种“等效厚度测量技术”,在磁控溅射时使用碳纳米管膜(溅射面积  $3.14 \text{ cm}^2$ )与内外径分别为 19 mm 和 50 mm,厚度为 1mm 的不锈钢(中心开孔  $\phi$  19 mm,溅射面积  $16.11 \text{ cm}^2$ )的组合基片作为基材(图 2)。

同时,由于溅射时碳纳米管膜位于基底平台中心,而组合基片的不锈钢部分位于基底平台边沿,因此需要对溅射到基底平台中心和边

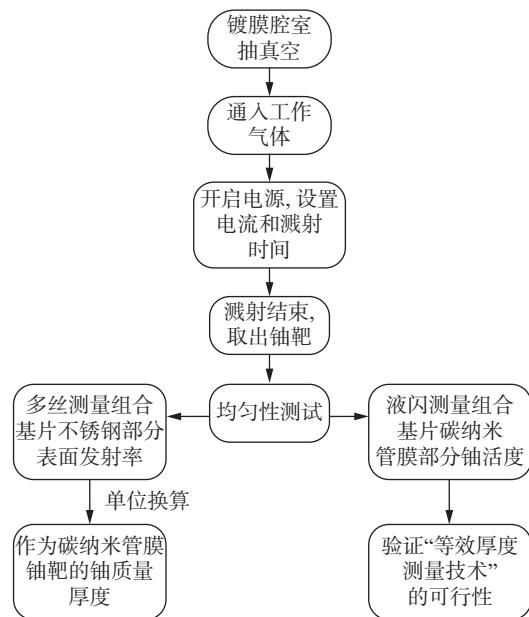


图 1 铀靶制备与测量流程图

Fig.1 Process diagram for uranium target preparation and measurement

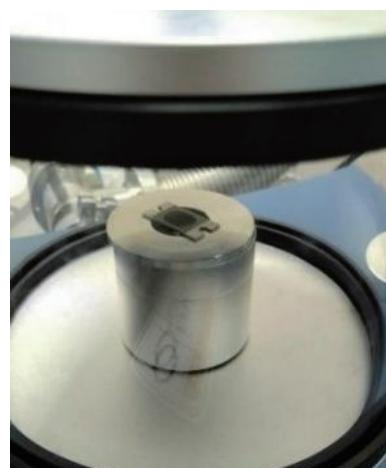


图 2 组合基片示意图

Fig.2 Schematic diagram of the combined substrate

沿的铀的均匀性进行验证。为此设计了两组以  $\phi 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的不锈钢圆片为基材的铀溅射实验,每组实验溅射 4 片不锈钢,其分布如图 3 所示。溅射后,将位于边沿的三个样品的表面发射率与位于中心的样品进行比较,以验证基底平台中心和边沿部分的铀溅射均匀性。

### 1.1 以碳纳米管膜为基材的铀溅射

本研究使用的碳纳米管膜为方形结构(图 4),其内部结构为碳纳米管阵列排列的 90°交叉结构,面密度与石墨等材料相比更小,因此更适合



图 3  $\phi 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  不锈钢基片分布图  
Fig.3  $\phi 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  stainless steel substrate distribution map

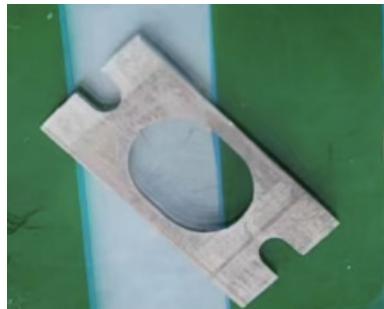


图 4 碳纳米管膜基材  
Fig.4 Carbon nanotube film substrate

用作中子核反应测量研究的超薄铀靶的基材。由于碳纳米管膜的厚度仅在纳米级,因此机械强度很小,使用时需要格外小心。为此设计了如图 2 所示的组合基片结构,以方便溅射时碳纳米管膜的拿取。

在溅射实验前,作为靶材的天然铀需先置于 8 mol/L 的硝酸中蚀刻,以清洗天然铀表面的氧化物杂质。蚀刻后用去离子水和乙醇擦拭天然铀表面,乙醇擦拭表面后迅速放入镀膜腔室中固定。溅射时,设置仪器本底真空为  $1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ ,工作真空为 0.1 Pa,电流为 10 mA,溅射时间为 15~30 min,共制备 5 组以碳纳米管膜为基材的超薄铀靶样品。

## 1.2 以不锈钢圆片为基材的铀溅射

由于使用“等效厚度测量技术”时是使用组合基片中边沿的不锈钢部分的铀表面发射率作为中心的碳纳米管膜铀靶的铀表面发射率,因此需要对溅射到中心和边沿的铀均匀性进行检验。为此,取 4 片尺寸为  $\phi 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的不

锈钢为基材,按中心和边沿分布在基底平台上进行铀溅射实验(分布图示于图 3)。溅射时,设置仪器的本底真空为  $1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ ,工作真空为 0.1 Pa,电流为 10 mA,溅射时间为 110 min,一共进行两组溅射实验。

## 2 铀靶厚度测量与分析

### 2.1 测量方法

本研究采用多种方法对铀靶的性能进行综合评价,以确保测量结果的准确性和可靠性。首先,使用  $2\pi\alpha$ 、 $2\pi\beta$  多丝正比计数器对组合基片不锈钢部分的铀表面发射率进行绝对测量,并将该结果作为碳纳米管膜铀靶的表面发射率,从而实现对碳纳米管膜铀靶的无损测量。这种方法不仅避免了直接测量碳纳米管膜可能带来的样品损坏或设备污染问题,还能够提供高精度的表面发射率数据,为后续的质量厚度计算奠定基础。

其次,为了进一步验证测量结果的准确性,本研究还采用液体闪烁计数器对组合基片碳纳米管膜部分的活度进行直接的破坏性分析。通过将直接测量与间接测量得到的结果分别进行单位换算,转换为碳纳米管膜铀靶的铀质量厚度,并对两者进行比较,以验证“等效厚度测量技术”的可行性。这一方法通过对比不同测量技术的结果,能够有效评估测量技术的可靠性和一致性,为铀靶质量厚度的精确测定提供科学依据。

最后,为了评估铀溅射的均匀性,本研究使用  $2\pi\alpha$ 、 $2\pi\beta$  多丝正比计数器表面发射率绝对测量装置对两组共八片  $\phi 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的不锈钢圆片铀靶的铀表面发射率进行了测定,并对基底平台中心和边沿部分的测量结果进行比较。这一步骤能够直观地反映铀溅射在基底上的分布均匀性,为优化溅射工艺和提高铀靶制备质量提供重要参考。

### 2.2 基于 $2\pi\alpha$ 、 $2\pi\beta$ 多丝正比计数器表面发射率绝对测量装置的铀靶测量

天然铀本身具备一定的  $\alpha$  粒子辐射,可以借助实验室已有的  $2\pi\alpha$ 、 $2\pi\beta$  多丝正比计数器表面发射率绝对测量装置测量其表面发射率<sup>[7-9]</sup>。为了消除电子学噪声并提高测量的精度,甄别器采用了 5 路甄别器电子学线路,单道下阈

分别为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 V 共五个通道 (技术框图示于图 5)。测量时, 分别记录五个下阈测得的计数率, 通过外推法得到下阈为 0 V 时的计数率。这种方法能够有效排除低能噪声

信号的干扰, 从而准确反映  $\alpha$  粒子的真实计数率。通过上述步骤, 完成一次测量, 并实现  $\alpha$  源的小能量外推。最终, 根据外推得到计数率, 计算出平面源的表面发射率。

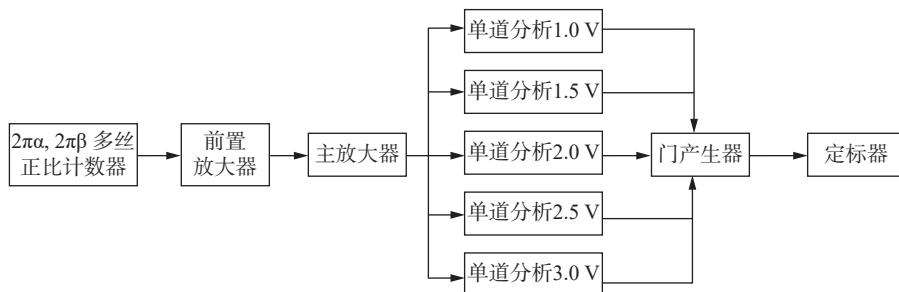


图 5  $2\pi\alpha, 2\pi\beta$  多丝表面发射率绝对测量装置技术框图

Fig.5 Technical diagram of the  $2\pi\alpha, 2\pi\beta$  multi-wire surface emission rate absolute measurement device

铀是长半衰期核素, 衰变放出  $\alpha$  粒子,  $T_{1/2}(^{238}\text{U})$ :  $4.468(5)\times 10^9$  a;  $T_{1/2}(^{235}\text{U})$ :  $7.04(1)\times 10^8$  a;  $T_{1/2}(^{234}\text{U})$ :  $2.455(6)\times 10^5$  a。在 ISO16638-1 中给出了天然铀(NU)的同位素及其丰度组成和总  $\alpha$  比活度(表 1)<sup>[10]</sup>。

表 1 天然铀同位素组成及其丰度和总  $\alpha$  比活度

Table 1 Composition and total alpha activity of natural uranium

$^{238}\text{U}$		$^{235}\text{U}$		$^{234}\text{U}$		总 $\alpha$ 比活度 Bq/g
同位素丰度	$\alpha$ 比活度	同位素丰度	$\alpha$ 比活度	同位素丰度	$\alpha$ 比活度	
99.2745%	48.26%	0.72%	2.25%	0.0055%	49.49%	$2.56\times 10^4$

$2\pi\alpha, 2\pi\beta$  多丝正比计数器表面发射率绝对测量装置测量  $\alpha$  计数的效率为 100%,  $\alpha$  表面发射率与源活度的转换系数  $\varepsilon$  为 0.5<sup>[11]</sup>, 因此取其中几份组合基片铀靶样品的不锈钢部分, 先测得其表面发射率, 随后根据下式(1)将表面发射率转换为铀靶的质量厚度( $D$ )。组合基片不锈钢部分的面积为  $16.11\text{ cm}^2$ , 天然铀的比活度为  $0.0256\text{ Bq}/\mu\text{g}$ 。

$$D = q/(\varepsilon S C)\mu\text{g}/\text{cm}^2 \quad (1)$$

式中:  $q$  为测量的表面发射率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $\varepsilon$  为  $\alpha$  表面发射率转换成源活度的系数, 取  $\varepsilon=0.5$ ;  $S$  为基片的溅射面积;  $C$  为天然铀的比活度,  $\text{Bq}/\mu\text{g}$ 。

测量时, 首先测量了  $2\pi\alpha, 2\pi\beta$  多丝表面发射率绝对测量装置的  $\alpha$  本底, 根据表 2 给出的测量结果, 单道阈值为 1.0 V 时  $\alpha$  本底水平为  $(0.049\pm 0.0064)\text{ s}^{-1}$ 。 $2\pi\alpha, 2\pi\beta$  多丝表面发射率绝对测量装置测量  $\alpha$  效率 100%, 取显著水平  $\alpha=0.01$ , 查表可得置信因子  $K_\alpha=2.330$ , 探测限( $A_{\min}$ )计算公式为:

$$A_{\min} = 2.33/\eta \times (B/T)^{1/2} \quad (2)$$

式中:  $\eta$  为探测效率, 1;  $B$  为仪器本底,  $\text{s}^{-1}$ ;  $T$  为测量时间, s。

由上式(2), 测量时间为 1000 s 时, 计算得到的探测限为  $0.0163\text{ s}^{-1}$ , 相当于  $1.3\text{ }\mu\text{g}$  天然铀质量。

$2\pi\alpha, 2\pi\beta$  多丝表面发射率绝对测量装置各个单道阈值下本底计数率平均值列于表 3。

随后使用  $2\pi\alpha, 2\pi\beta$  多丝正比计数器表面发射率绝对测量装置测定了组合基片中不锈钢部

表 2  $2\pi\alpha, 2\pi\beta$  多丝表面发射率测量装置  $\alpha$  本底测量结果

Table 2  $2\pi\alpha, 2\pi\beta$  multi-wire surface emission rate measurement device  $\alpha$  background measurement results

序号	测量时间/s	计数	本底计数率/ $\text{s}^{-1}$	平均计数率/ $\text{s}^{-1}$	标准偏差/ $\text{s}^{-1}$
1	1000	48	0.048		
2	1000	42	0.042		
3	3000	160	0.053		
4	1000	51	0.051	0.049	0.0064
5	1000	43	0.043		
6	1000	59	0.059		

表 3  $2\pi\alpha$ 、 $2\pi\beta$  多丝表面发射率绝对测量装置各单道  
阈值下  $\alpha$  本底计数率

Table 3 The background count rates of  $2\pi\alpha$  and  $2\pi\beta$   
multi-wire surface emission rate absolute measurement  
device at each single value threshold

阈值/V	本底计数率/ $s^{-1}$	标准偏差/ $s^{-1}$
1.0	0.049	0.0064
1.5	0.042	0.0065
2.0	0.039	0.0062
2.5	0.037	0.0061
3.0	0.036	0.0060

分的铀表面发射率,以此作为碳纳米管膜铀靶的表面发射率。

由于组合基片中碳纳米管膜置于基底平台中心,而“等效厚度测量技术”中作为替代测量的不锈钢部分位于基底平台边沿,因此需要验证溅射到基底平台中心和边沿部分铀的均匀性。为此使用4片尺寸为 $\phi 20\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的不锈钢为基材,按中心和边沿分布在基底平台上进行铀溅射实验。溅射后使用 $2\pi\alpha$ 、 $2\pi\beta$  多丝正比计数器表面发射率绝对测量装置测定每个不锈钢铀靶的表面发射率,并比较边沿样品的表面发射率与中心样品的表面发射率,从而验证溅射到中心和边沿铀的均匀性。

### 2.3 基于液体闪烁体计数器的铀靶测量

在获取组合基片中不锈钢部分的铀质量厚度后,需要对组合基片中碳纳米管膜铀靶进行直接测量,以验证溅射到组合基片中不锈钢部分与碳纳米管膜部分铀质量厚度的一致性。三管液闪计数法(TDCR法)是一种活度绝对测量方法,可以直接给出样品的活度<sup>[12-14]</sup>。本研究使用HIDEX液闪计数器脉冲长度指数(PLI)技术进行 $\alpha$ 、 $\beta$ 甄别,以满足碳纳米管膜铀靶样品的活度测量需求<sup>[15]</sup>。通过TDCR法测量碳纳米管膜铀靶活度的方法属于破坏性的直接测量,测量完成后,通过式(3)将碳纳米管膜铀靶的活度转换成铀的质量厚度,并与对应组合基片中不锈钢部分的铀质量厚度进行比较,以验证“等效厚度测量技术”的可行性。

$$D = A/(SC) \quad (3)$$

式中:  $D$  为铀质量厚度,  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ;  $A$  为测量得到的活度,  $\text{Bq}$ ;  $S$  为基片的溅射面积,  $1.64\text{ cm}^2$ 。

通过制备液闪源测定铀靶活度的方法属于

破坏性分析,因此选择2.1节实验中溅射时间不同的三份碳纳米管膜铀靶样品进行实验。在测量碳纳米管膜铀靶之前,为了验证液闪测量结果的可靠性,使用实验室已有的天然铀标准溶液制备液闪源测量,并将测量结果与标准值进行比较。

## 3 结果与讨论

### 3.1 基于 $2\pi\alpha$ 、 $2\pi\beta$ 多丝正比计数器表面发射率 绝对测量装置的铀靶测量

**3.1.1 组合基片中不锈钢部分的铀表面发射率测量** 使用 $2\pi\alpha$ 、 $2\pi\beta$  多丝正比计数器表面发射率绝对测量装置,测定了溅射后的五份组合基片的不锈钢部分(溅射面积 $16.11\text{ cm}^2$ )的铀表面发射率,将表面发射率代入式(1)后计算得出天然铀的质量厚度。由表4可见,组合基片不锈钢部分的天然铀最大质量厚度为 $3.51\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。

表 4 组合基片中不锈钢部分的铀表面发射率测量结果

Table 4 Measurement results of uranium surface  
emission rate in stainless steel part of composite substrate

源编号	表面发射率/ $s^{-1}$	NU质量厚度/ $(\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$	标准偏差/ $s^{-1}$
NU-50×4-1	0.285	1.38	0.0017
NU-50×4-2	0.723	3.51	0.0087
NU-50×1-1	0.262	1.27	0.0029
NU-50×1-2	0.521	2.53	0.0042
NU-50×1-3	0.445	2.16	0.0071

**3.1.2  $\phi 20\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  的不锈钢圆片铀靶的表面发射率测量** 使用 $2\pi\alpha$ 、 $2\pi\beta$  多丝正比计数器表面发射率绝对测量装置测定了两组共八片 $\phi 20\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  的不锈钢圆片铀靶的铀表面发射率,测量结果列于表5。

在两组铀靶样品中,NU-20×1-1 和 NU-20×1-5 为置于基底平台中心的样品,进行偏差计算时分别以NU-20×1-1 和 NU-20×1-5 的表面发射率作为参考进行比较。NU-20×1-1~NU-20×1-4 这组样品中,边沿样品与中心样品的最大偏差为 10.3%, 边沿三个样品的质量厚度平均值为 $17.4\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ , 与中心样品的偏差为 2.8%。NU-20×1-5-1~NU-20×1-1-8 这组样品中,边沿样品与中心样品的最大偏差为 5.9%, 边沿三个样品的质量厚度平均值为 $11.7\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ , 与中心样品的偏差为 1.9%。均匀性分布测量结果说明,抽气口

表 5  $\phi 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的不锈钢圆片铀靶的铀表面发射率  
测量结果

Table 5 Measurement results of uranium surface emission rate of stainless steel disc uranium target with a diameter of  $20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$

源编号	表面发射率/ $\text{s}^{-1}$	NU质量厚度/ $(\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$	标准偏差/ $\text{s}^{-1}$	偏差/ %
NU-20×1-1	0.680	16.9	0.0605	0
NU-20×1-2	0.750	18.7	0.0570	10.3
NU-20×1-3	0.714	17.8	0.0500	5.0
NU-20×1-4	0.636	15.8	0.0541	-6.5
NU-20×1-5	0.474	11.8	0.0119	0
NU-20×1-6	0.482	12.0	0.0068	1.7
NU-20×1-7	0.478	11.9	0.0010	0.1
NU-20×1-8	0.448	11.1	0.0394	5.9

的位置设置对溅射有一些影响, 溅射面与抽气口临近部位溅射厚度大一些, 远离抽气口方向的溅射厚度会小一些。边沿三个样品的质量厚度平均值与中心样品质量厚度的偏差较小, 由此说明溅射时中心部分与边沿部分的铀分布均匀性较好。

使用  $2\pi\alpha$ 、 $2\pi\beta$  多丝正比计数器表面发射率绝对测量装置测定了组合基片不锈钢部分的表面反射率, 期望以此作为碳纳米管膜铀靶的表面

反射率。同时, 测量了两组共八片  $\phi 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的不锈钢圆片铀靶的表面发射率并进行比较, 验证了溅射时基底平台中心部分与边沿部分的铀分布均匀性。

### 3.2 基于液体闪烁体计数器的铀靶测量

**3.2.1 天然铀标准溶液活度测量** 对实验室已有的天然铀标准溶液用半微量天平称取 0.02666 g, 加入 15 mL 闪烁液制备液闪源, 用 HIDEX 液体闪烁计数器的  $\alpha$ 、 $\beta$  鉴别模式进行测量。测量时, 设置测量时间为 10 000 s, 并得到如图 6 所示的二维  $\alpha$ 、 $\beta$  谱, 图中  $X$  轴为道数,  $Y$  轴为脉冲长度。可以看到图中上方的  $\alpha$  岛与下方的  $\beta$  岛能够分离, 将  $\alpha$  岛部分的计数统计即为总  $\alpha$  计数。

设置  $\alpha$  感兴趣区间(ROI)在 500~800 区间, PLI 为 40, 得出 PLI  $\alpha$  计数为 315 462, 仪器给出的 TDCR 值为 0.9997, 经过死时间修正后得到天然铀标准溶液的活度  $A$  为 31.56 Bq(见表 6), 计算得到天然铀溶液的活度浓度  $A_m$  为:

$$A_m = \frac{A}{m} = \frac{31.56 \text{ Bq}}{0.02666 \text{ g}} = 1183.7 \text{ Bq/g}$$

表 1 给出了天然铀的总  $\alpha$  比活度为  $2.56 \times 10^4 \text{ Bq/g}$ , 据此可以将液闪测量结果由活度浓度转

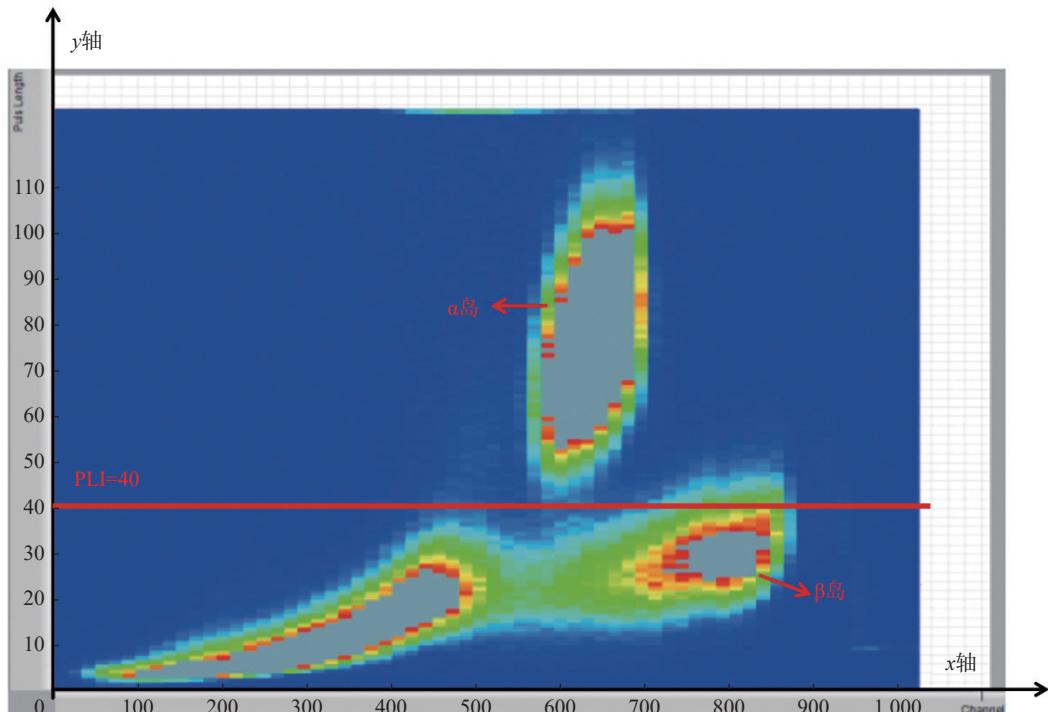


图 6 天然铀标准溶液的二维  $\alpha$ 、 $\beta$  谱

Fig.6 Two dimensional  $\alpha$  and  $\beta$  spectrum of natural uranium standard solution

表 6 用液体闪烁计数器测量天然铀溶液比活度

Table 6 Measurement of specific activity of natural uranium solution using liquid scintillation counter

质量/g	测量时间/s	α计数	TDCR	测量活度/Bq	活度浓度/(Bq·g <sup>-1</sup> )	铀质量百分数/%	标准值/%	偏差/%
0.02666	10000	315472	0.9997	31.56	1183.7	0.0462	0.0464	-0.4

化为质量百分数  $\rho$ (每单位质量溶液中铀的质量):

$$\rho = \frac{A_m}{\text{总比活度}} \times 100\% =$$

$$\frac{1183.7 \text{ Bq/g}}{2.56 \times 10^4 \text{ Bq/g}} \times 100\% = 4.62\%$$

与标准溶液的结果(4.64%)进行比较,两者之间的偏差为-0.4%。由此可见,由α、β甄别测得的总α计数经计算后得到最终的天然铀标准溶液的浓度,与天然铀标准溶液的标准值一致。

**3.2.2 碳纳米管膜铀靶活度测量** 使用液体闪烁计数器测量了3枚碳纳米管膜铀靶,源编号分别为NU-50×4-2, NU-50×1-2, NU-50×1-3。在溅射实验完成后,将碳纳米管膜靶整体放入25 mL玻璃液闪瓶内(确保没有放射性损失)后加入15 mL Ultima Gold LLT闪烁液制备液闪源(图7),用液体闪烁计数器测量天然铀的活度,并根据式(3)给出的换算公式计算后给出碳纳米管膜靶的铀质量厚度,结果列于表7。

通过比较标准值与由液闪计数器测量得到的天然铀标准溶液的比活度(偏差仅为-0.4%),验证了液闪测得数据的可行性。由式(2)将 $2\pi\alpha$ 、 $2\pi\beta$ 多丝表面发射率绝对测量装置测得的结果转换得到组合基片不锈钢部分铀质量厚度,由式(1)将三管液体闪烁计数器测得的结果转换为组合基片的碳纳米管膜部分铀质量厚度,并对二者进行对比,结果列于表8。

由表8可以看出,两种绝对测量方法给出的结果最大偏差为-4.8%,表明用 $2\pi\alpha$ 、 $2\pi\beta$ 多丝正比计数器表面发射率测量装置测量溅射到不锈钢片表面的天然铀α表面发射率可以准确计算碳纳米管膜铀靶厚度。

表 8 两种绝对测量方法计算的厚度结果比较

Table 8 Comparison of thickness results calculated by two absolute measurement methods

源编号	2πα、2πβ多丝表面发射率测量装置		液体闪烁计数器		偏差
	活度/Bq	质量厚度/(μg·cm <sup>-2</sup> )	活度/Bq	质量厚度/(μg·cm <sup>-2</sup> )	
NU-50×2-2	1.446	3.51	0.256	3.44	2.0%
NU-50×1-2	0.543	2.63	0.197	2.65	-0.7%
NU-50×1-3	0.444	2.15	0.1685	2.26	-4.8%

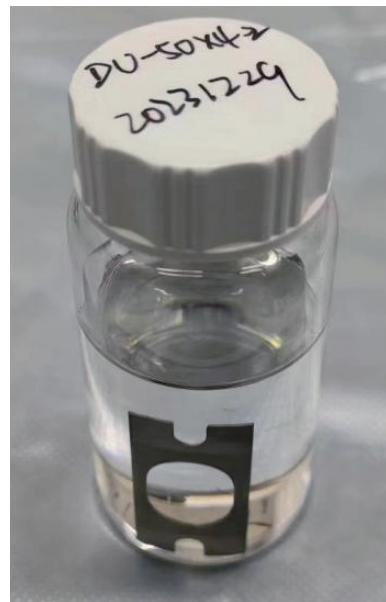


图 7 用碳纳米管膜铀靶制备的液闪源

Fig.7 Liquid scintillation source prepared using carbon nanotube film uranium target

表 7 液体闪烁计数器测量碳纳米管膜铀靶质量厚度

Table 7 Measurement of mass thickness of carbon nanotube film uranium target by liquid scintillation counter

源编号	活度/Bq	质量厚度/(μg·cm <sup>-2</sup> )	不确定度/%
NU-50×4-2	0.256	3.44	2.2
NU-50×1-2	0.197	2.65	2.2
NU-50×1-3	0.169	2.26	2.2

#### 4 结论

本研究成功开发了一种无损测量易碎且黏附性较强的超薄碳纳米管膜铀靶的“等效厚度测量技术”,通过比较直接测量与间接测量的结果,验证了其可行性。此外,还验证了溅射过程中铀的均匀性,表明该技术能够有效测量铀

靶的厚度。该研究为铀靶的无损测量提供了一种新的有效方法,具有重要的应用价值和推广前景。

### 参考文献:

- [1] Chen L, Gong J, Wang K, et al. Neutron multiplicity assay device and experiment progress on Pu-U components[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(1): 014005.
- [2] 胡根,亢武,向永春,等.符合中子法测量贫化铀部件质量技术研究[J].*原子能科学技术*,2012,46(7): 871-877.  
Hu Gen, Kang Wu, Xiang Yongchun, et al. Mass measurement of depleted uranium components with coincidence neutron count[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2012, 46(7): 871-877 (in Chinese).
- [3] Berbil-Bautista, Torben Hnke, Mathias Getzlaff, et al. Uranium film epitaxy on single-crystal Tungsten using STM[J]. Surface Science, 2018, 677: 1-7.
- [4] 于震,孙亮,张志忠,等.离子镀膜法制备铀薄膜的表征[J].*核化学与放射化学*,2014,36(5): 277-281.  
Yu Zhen, Sun Liang, Zhang Zhizhong, et al. Characterization of uranium thin film prepared by ion plating[J]. *Journal of Nuclear and Radiochemistry*, 2014, 36(5): 277-281 (in Chinese).
- [5] SPROUL W A. Sputtering of Materials[M]// MAISSEL L I, GLANG R. Handbook of Thin Film Technology. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [6] HOFFMANN F, PEISSKER H. Sputtering and Sputter Deposition[M]// MAISSEL L I, GLANG R. Handbook of Thin Film Technology. Berlin: Springer, 1996.
- [7] L'Annunziata M F. Handbook of Radioactivity Analysis[J]. Elsevier/Academic Press, 2012. DOI: [10.1016/B978-0-12-385072-0.00001-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385072-0.00001-1).
- [8] Hofstetter K, Hult M. Absolute alpha-particle emission rate measurements with a multiwire proportional counter[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1995, 361(2-3): 399-404.
- [9] Wright C J, Hult M. Absolute alpha-particle emission rate measurements with a multiwire proportional counter[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1997, 394(1-3): 217-222.
- [10] ISO 16638-1:2017. Radiological protection—Monitoring and internal dosimetry for staff members exposed to medical radionuclides as unsealed sources — Part 1: General principles[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.
- [11] Knoll, Glenn F. Radiation detection and measurement[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 69(4): 495-495.
- [12] C. P. T. de Vries, The triple-to-double coincidence ratio (TDCR) method for activity measurement[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2003, 257(3): 551-558.
- [13] de Meijer, S M. The Triple-to-double Coincidence Ratio (TDCR) method for activity measurement of radionuclides[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2002, 486(1-2): 1-11.
- [14] de Vries, L T L T. The triple-to-double coincidence ratio (TDCR) method for activity measurement of radionuclides[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2004, 528(1-2): 1-11.
- [15] de Vries, C P T. Pulse Shape Discrimination in liquid scintillation counting[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1995, 359(1-2): 181-187.