

电流型银激活探测器标定技术

宋朝晖, 管兴胤, 李刚, 张子川, 刘君红

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 为测量 DPF 脉冲中子产额, 设计了电流型银激活探测器。该探测器由中子慢化体、天然银片、塑料闪烁体和光电倍增管组成。定义了该探测器测量 DPF 快脉冲中子产额时的探测灵敏度。采用高压倍加器稳态中子源对电流型银激活探测器的探测灵敏度进行了标定。稳态中子源的绝对中子产额由伴随粒子法给出。通过计算机自动记录探测器在饱和照射后其输出电流随时间的变化曲线, 通过分析变化曲线求解特征参数, 进而得到电流型银激活探测器在距离 14 MeV 脉冲中子源 1 m 处时的探测灵敏度为 $1.843 \times 10^9 \text{ nA}^{-1}$ 。在包含因子 k 为 2 时, 探测灵敏度的扩展不确定度小于 17.5%。

关键词: 银激活探测器; 光电倍增管; 灵敏度; 中子源; 伴随粒子法

中图分类号: O571.53; TL816.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931 (2010) S0-0430-05

Calibration Method of Silver-Activated Detector Working in Current-Mode

SONG Zhao-hui, GUAN Xing-yin, LI Gang, ZHANG Zi-chuan, LIU Jun-hong

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: A silver-activated detector working in current-mode was designed in order to measure the yield of a DPF pulsed neutron source. The detector was made up of neutron moderating material, natural silvers, plastic scintillators and a photo-multiplier tube. The detection sensitivity to a DPF pulsed neutron source was defined. The detector was calibrated by a high voltage neutron generator. The neutron flux of this constant neutron source was absolutely measured by associated particle method. When the detector was saturated irradiated, output currents were recorded by the computer automatically. By analyzing the varied current curve, typical parameters were deduced. When the silver-activated detector is 1 m far from the 14 MeV pulsed neutron source, the detection sensitivity is about $1.843 \times 10^9 \text{ nA}^{-1}$. When coverage factor is 2, the expand measurement uncertainty is less than 17.5%.

Key words: silver-activated detector; photo-multiplier tube; sensitivity; neutron source; associated particle method

快脉冲中子产额的准确测量对于研究等粒子体物理和惯性约束核聚变等都具有十分重要的意义^[1-3]。活化分析法由于其超快的时间响应、超宽的探测范围, 成为高强度快脉冲中

子产额测量的首选探测方法。银作为活化元素在测量脉冲中子束流方面已使用了多年, 这些设备通常都是将一块银箔缠绕在盖革-弥勒或正比计数器上组成银激活探测器^[4-7]来测量中子产

收稿日期: 2010-06-30; 修回日期: 2010-07-31

作者简介: 宋朝晖 (1971—), 男, 湖北蕲春人, 研究员, 博士, 核技术及应用专业

额。本工作设计一电流型银激活探测器。该探测器由中子慢化体、天然银片、塑料闪烁体以及光电倍增管所组成。采用高压倍加器的稳态 14 MeV 中子源对电流型银激活探测器进行了标定，得到其在特定位置的探测灵敏度。

1 探测器简介

电流型银激活探测器的突出优点为：它直接采用集成化程度很高的小电流计来记录光电倍增管阳极输出电流随时间的变化，不需要另外再增加主放大器、甄别器和时间多道等电子学器件。与 GM 计数器、正比计数器等传统计数方法相比，电流型银激活探测器具有更高的分辨时间、更大的动态范围、更长的寿命，且可更好地工作在加速器条件下。

新设计的银激活探测器具体结构为：9 片天然银箔（150 mm×120 mm×0.25 mm）、10 片塑料闪烁体（150 mm×120 mm×3 mm）、1 块有机玻璃梯形光导和 1 只光电倍增管。其中每片天然银箔都夹在两片塑料闪烁体之间，像“三明治”一样。在“三明治”的外部包裹了 1 层 1.5 mm 厚的镉吸收套，以减小周围环境散射中子的影响，镉吸收套的外部是探测器外壳，由 20 mm 厚的含硼聚乙烯板组成。光电倍增管除自带的磁屏蔽套外，其外壳还由电工纯铁（DT4E）加工而成，以增强抗电磁干扰能力。

探测器距离中子源越远，散射中子的影响越大。过大的散射会增加标定结果对环境的依赖性，使探测器在新的环境中使用时测量不确定度较大。为减小散射中子影响，使用时还需将探测器放于厚度为 100 mm 聚乙烯屏蔽体内。

2 灵敏度标定

2.1 灵敏度标定的原理

银激活探测器灵敏度标定的困难在于不可能找到与待测 DPF 中子源能谱相近、工作方式也近似的标准脉冲中子源，因此，只能采用稳态中子源进行灵敏度相对标定。标定实验是在中国原子能科学研究院 600 kV 高压倍加器上利用 DT 反应进行的，入射 D 粒子平均能量约为 200 keV。探测器置于 0° 方向，采用 135° 伴随粒子靶管对束流强度进行绝对测量。实验布局示于图 1。将高压倍加器中子束流打开并保持恒定的强度，照射至少 150 s 以便使天然银中半衰期为 24.2 s 的快成份达到近似平衡。然后，通过磁铁将氘粒子迅速偏离原来的入射方向，使加速器中子源突然关闭。用小电流计记录整个标定过程中探测器输出电流随时间的变化情况，采集到的数据经 IEEE-488 卡实时地传输到计算机存储，形成时间与电流一一对应的数据文件。实时的输出电流反映了银的 β 衰变情况，为便于分析，记录时间应不小于 400 s。

图 2 所示为银激活探测器输出电流随时间的变化过程。最初，只能观察到本底电流，然后，随着加速器的打开，电流立刻上升到 1 个平台，这归因于照射期间闪烁体内反冲质子和 β 衰变共同产生的荧光。最后，关闭中子源，电流并不是像上升过程那样迅速地下降到本底值，而是垂直下降到某一值后开始缓慢下降，此时观察到的是银的 β 衰变。 β 衰变过程主要由 ^{110}Ag 和 ^{108}Ag 快、慢两种成分组成^[5-7]。

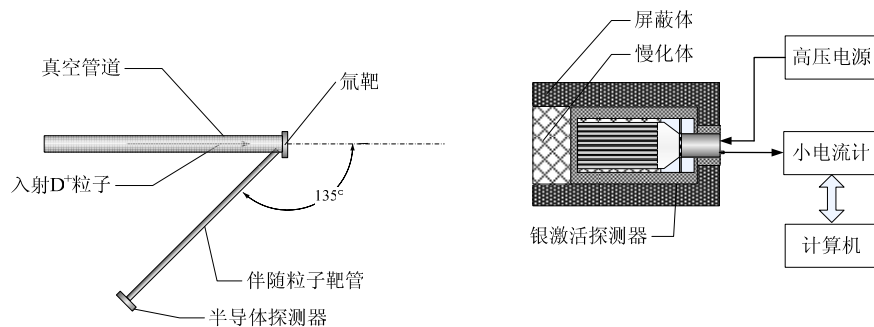


图 1 银激活探测器灵敏度标定示意图

Fig. 1 Sketch of sensitivity calibration for silver-activated detector

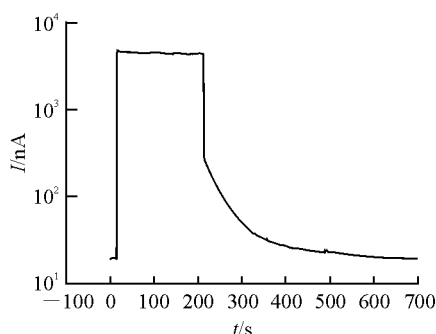


图2 输出电流随时间的变化

Fig. 2 Output current as function of time

图2中加速器中子束流关闭时刻 t_0 之后,探测器的输出电流变化可表示为:

$$I(t) = I_1 e^{-\lambda_1(t-t_0)} + I_2 e^{-\lambda_2(t-t_0)} + I_b \quad (1)$$

式中: λ_1 为 ^{110}Ag 的衰变常数, $2.86 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$; λ_2 为 ^{108}Ag 的衰变常数, $4.81 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$; t_0 为中子束流关闭的时刻; I_b 为本底电流; I_1 、 I_2 为待定系数。

电流数据用式(1)拟合,参数 I_b 、 I_1 、 I_2 用最小二乘法决定。

探测灵敏度 ε 根据快中子脉冲过后 ^{110}Ag 的衰变率定义:

$$\varepsilon = I_1 / \phi \quad (2)$$

其中: ϕ 为到达探测器的中子通量, cm^{-2} 。

ε 这样定义的原因是假设脉冲持续的时间远小于探测器的衰变时间 $1/\lambda_1$ (通常中子源单次脉冲持续的时间 $< 5 \mu\text{s}$,而 $1/\lambda_1 \approx 34.91 \text{ s}$,满足假设条件)。因为无法得到已知通量的快脉冲中子源进行标定。作为替代,探测灵敏度是根据下述方法以1个长脉冲的衰变率推知的。这里的探测灵敏度与探测器结构、活化截面、中子能谱、银的靶核数等诸多因素有关,由于这些因素并不发生改变,因此,可将它们当成整体,认为银激活探测器的灵敏度只是输出电流和到达探测器的中子通量的函数。

稳态中子源在 $t=0$ 时打开并以恒定的束流强度 ψ 照射一段时间(t_0)后,将产生同样的半衰期为 24.2 s 的 β 衰变。根据活化公式^[8],则当 $t=t_0$ 时,有:

$$\psi = \frac{\lambda_1 \phi}{1 - e^{-\lambda_1 t_0}} \quad (3)$$

联立式(2)、(3)可得:

$$\varepsilon = \frac{\lambda_1 I_1}{\psi(1 - e^{-\lambda_1 t_0})} \quad (4)$$

当活化时间足够长(超过6个半衰期)时,可认为基本达到了饱和。此时式(4)可简化为:

$$\varepsilon = \frac{\lambda_1 I_1}{\psi} \quad (5)$$

因此,只要知道到达探测器的束流强度 ψ ,探测灵敏度 ε 即可确定。

2.2 特定位置的探测灵敏度

灵敏度标定时,通常可用长计数器决定照射时的束流强度 ψ 。在本实验中,为提高标定精度,不直接测量 ψ ,而是测量 4π 空间总的中子通量率 n_t 。一般而言,应有 $\psi = n_t / (4\pi L^2)$ (L 为探测器灵敏中心与中子源之间的距离)。由于探测器灵敏中心位置很难确定,使 L 的值也很难确定。为避免使用反平方关系来计算 ψ ,无论标定时或在实际测量DPF中子源时,都将探测器前表面与中子源之间的距离固定为 1 m 。探测器中心位置和对源所张立体角均保持不变,只考虑中子源的产额。因此,大幅降低了测量不确定度。 n_t 的绝对测量通过伴随粒子法给出^[9]。

定义 k 为距离换算因子,则有:

$$N_c = k\psi \quad (6)$$

$$N_m = k\phi \quad (7)$$

其中: N_c 为灵敏度标定时 4π 空间总的平均中子通量率, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; N_m 为DPF源的中子产额,即单次脉冲出射到 4π 空间内总的中子数。

联立式(5)、(6)可得:

$$\varepsilon = \lambda_1 I_1 k / N_c \quad (8)$$

将 I_1^c 、 I_1^m 分别定义为对应于灵敏度标定、

DPF脉冲测量两种不同情况下,拟合式(1)得到的待定系数 I_1 。

将式(7)代入式(5)得:

$$\varepsilon = I_1^m k / N_m \quad (9)$$

式(8)改写为:

$$\varepsilon = \lambda_1 I_1^c k / N_c \quad (10)$$

比较式 (9)、(10) 可得：

$$N_m = N_c I_1^m / (\lambda_1 I_1^c) \quad (11)$$

N_c 通过监测 D-T 反应伴随的 α 粒子计数率求得。设灵敏度标定时，辐照时间 t_0 内金硅面垒半导体探测器监测到的伴随 α 粒子的平均计数率为 n_α ，伴随系数为 η_α ，则有：

$$N_c = n_\alpha \eta_\alpha \quad (12)$$

将式 (12) 代入式 (11) 得：

$$N_m = n_\alpha \eta_\alpha I_1^m / (\lambda_1 I_1^c) \quad (13)$$

定义在特定位置银激活探测器对 4π 空间总的中子数的探测灵敏度为 ε_m ：

$$\varepsilon_m = n_\alpha \eta_\alpha / (\lambda_1 I_1^c) \quad (14)$$

将式 (14) 代入式 (13) 中，有：

$$N_m = \varepsilon_m I_1^m \quad (15)$$

在稳态加速器中子源上标定出银激活探测器灵敏度 ε_m 之后，便可根据式 (15) 求出 DPF 源的中子产额。

2.3 探测灵敏度的确定

从式 (14) 可看出，待定系数 I_1^c 的确定对探测器灵敏度 ε_m 的计算十分关键。因为 n_α 的监测采用对 α 粒子探测效率为 100% 的金硅面垒半导体探测器，通过多道幅度分析器 (MCA) 给出，可做到非常准确， $\eta_\alpha = A_\alpha / \Delta \Omega =$

1.251×10^7 ， $\lambda_1 = 2.86 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 均为已知量，因此，只需得到待定系数 I_1^c 就可以计算得到距离脉冲中子源 1 m 处、银激活探测器的探测灵敏度 ε_m 。

以下通过实例做进一步说明。图 3 所示为效率标定时，中子源关闭后银激活探测器输出电流随时间的变化情况。图中实线是根据式 (1) 拟合的曲线。

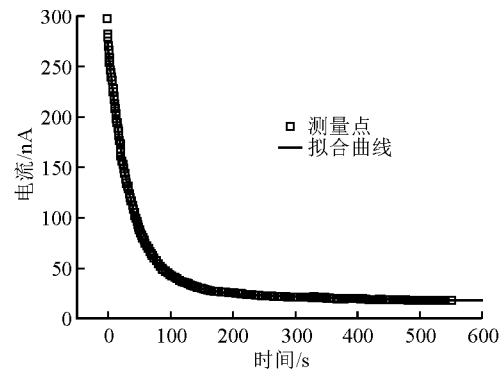


图 3 灵敏度标定时下降段曲线

Fig. 3 Decline curve at sensitivity calibration

用最小 Chi-square 值来选取本底电流 I_b 、待定系数 I_1^c 、 I_2^c 等参数。

灵敏度标定共进行了 3 次，3 次标定的相关数据及处理结果列于表 1。

数据处理时，取 3 次标定的平均值，可得到 $\bar{\varepsilon}_m = 1.843 \times 10^9 \text{ nA}^{-1}$ 。

表 1 银激活探测器灵敏度标定结果

Table 1 Results of sensitivity calibration of silver-activated detector

标定次数	I_b/nA	I_1^c/nA	I_2^c/nA	t_0/s	n_α/s^{-1}	$\varepsilon_m/\text{nA}^{-1}$
第 1 次标定	17.09±0.04	253.23±0.23	21.99±0.13	197.65	1 082.28	1.867×10 ⁹
第 2 次标定	16.67±0.05	258.04±0.32	29.94±0.18	375.44	1 081.85	1.831×10 ⁹
第 3 次标定	16.38±0.04	250.62±0.23	21.25±0.15	196.34	1 050.05	1.830×10 ⁹

3 不确定度分析

根据式 (14)，影响探测器灵敏度的因素有 4 项： n_α 、 η_α 、 λ_1 及 I_1^c 。由于 λ_1 近似可看作常数，伴随系数为 η_α 由设计决定，它们均可看作 B 类不确定度。伴随 α 粒子平均计数率 n_α 主要受束流稳定性影响。 $n_\alpha \eta_\alpha$ 为伴随粒子法监测的中子注量率，对于 T (d, n) ⁴He 反应中子源注量率入射 D 粒子能量 $E_D = 200 \text{ keV}$ 时，其

精度可高达 1%^[9]。待定系数 I_1^c 的不确定度来源比较复杂。散射本底的影响、光电倍增管输出电流的稳定性、小电流计记录的电流幅度及其时间的可靠性以及后续数学处理方法的准确性是主要不确定度来源。表 2 列出各影响量相对标准不确定度^[10]，相对合成标准不确定度 < 8.75%。

根据以上分析，探测灵敏度的扩展不确定

度小于 17.5% ($k=2$)。

表 2 灵敏度标定不确定度分析

Table 2 Uncertainty analysis of sensitivity calibration

序号	影响量	数据来源	类型	相对标准不确定度/%
1	中子注量率监测	实验结果	A	<2.00
2	小电流计记录	检定结果	B	<0.10
3	PMT 电流输出	实验结果	A	<2.50
4	散射本底影响	实验结果	A	<7.50
5	拟合法求参数	理论分析	B	<3.00
6	衰变常数	文献数据	B	<1.00

4 结论

针对新设计的电流型银激活探测器,研究了该探测器测量 DPF 快脉冲中子产额时的标定技术。采用高压倍加器稳态中子源对电流型银激活探测器进行饱和照射,通过分析探测器输出电流随时间的变化曲线,求解特征参数,进而得到电流型银激活探测器在距离 DT 脉冲中子源在特定位置处的探测灵敏度。该方法对标定 DD 中子源同样适用。

本工作得到了中国原子能科学研究院核物理所侯龙、卢涵林研究员、阮锡超博士的指导和帮助。实验过程中中国原子能科学研究院 600 kV 高压倍加器运行组给予了大力支持和密切配合。在此对他们表示衷心的感谢!

参考文献:

[1] 徐家云, 白立新, 张一云, 等. 靶室散射对 ICF 中子产额用铅活化法测量准确性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16 (9): 1 143-1 147.
XU Jiayun, BAI Lixin, ZHANG Yiyun, et al. Effect of target chamber-scattered neutrons on ICF neutron yield measurement accuracy by Pb activation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(9): 1 143-1 147(in Chinese).

[2] 艾杰, 马景芳, 范锐锋, 等. 一种适用于低产额脉冲中子测量的铜活化探测器研究[J]. 核电子学

与探测技术, 2009, 29 (3): 550-553.

AI Jie, MA Jingfang, FAN Ruifeng, et al. Study of a kind of copper activation detector for low yield pulse neutron measurement[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2009, 29(3): 550-553(in Chinese).

- [3] YOUNG F C. Neutron diagnostics for pulsed plasma sources[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1975, NS-22: 718-723.
- [4] SLAUGHTER D R, PICKLES W L. A highly sensitive silver-activation detector for pulsed neutron sources[J]. Nucl Instr and Meth, 1979, 160: 87-92.
- [5] DIGHE P M, PRASAD K R, KATARIA S K. Silver-lined proportional counter for detection of pulsed neutrons[J]. Nucl Instr and Meth A, 2004, 523: 158-162.
- [6] 吕铭方, 韩旻, 王新新. 用银激活计数器测量快脉冲中子[J]. 核电子学与探测技术, 1994, 14(4): 212-217.
LU Mingfang, HAN Min, WANG Xinxin. Measuring fast pulsed neutron with silver-activated counter[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1994, 14(4): 212-217 (in Chinese).
- [7] 郭志刚, 韩旻, 王昕. DPF 脉冲中子源中子产额的活化测量研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41 (3): 43-46.
GUO Zhigang, HAN Min, WANG Xin. Activation detection of the neutron yield from a DPF pulsed neutron source[J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 2001, 41(3): 43-46(in Chinese).
- [8] 汲长松. 核辐射探测器及其实验技术手册[M]. 北京: 原子能出版社, 1990: 180.
- [9] 仲启平, 陈雄军, 卢涵林, 等. 伴随粒子法测量 T (d, n)⁴He 中子源注量率中的本底处理[J]. 原子能科学技术, 2005, 39 (2): 131-133.
ZHONG Qiping, CHEN Xiongjun, LU Hanlin, et al. Background analysis for an associated particle method to measure the neutron fluence rate from the T(d, n)⁴He neutron source[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2005, 39(2): 131-133(in Chinese).
- [10] 叶德培. 测量不确定度[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.