

文章编号: 1007-4627(2006)01-0066-04

一种用于同位素分离在线穆斯堡尔谱学的 PPAC*

黄彦君, 林俊, 夏元复

(南京大学物理系, 江苏 南京 210093)

摘要: 研制了一种用于同位素分离在线穆斯堡尔谱学的平行板雪崩计数器, 计数器仅重 40 g。用它测量由穆斯堡尔共振吸收后放出的内转换电子, 采用 85% ^{119}Sn 同位素增丰的 SnO_2 作为阴极吸收材料, 测得的穆斯堡尔谱的信噪比为 11, 是一种适合在线穆斯堡尔实验的计数器。对该计数器的性能进行了讨论。

关键词: 在线穆斯堡尔谱学; 内转换电子; 平行板雪崩计数器; 信噪比

中图分类号: O572 **文献标识码:** A

1 引言

40 年以来, 大型的在线同位素分离装置 (ISOL) 已在 CERN, GSI, INL, RIKEN 等众多机构建立起来, 并用于了放射性核素在固体物理中的研究^[1-3]。这使得很多具有短寿命的穆斯堡尔核素能够用于穆斯堡尔实验^[4], 比如 ^{57}Mn ($T_{1/2} = 1.45$ min), ^{119}Sb ($T_{1/2} = 38$ h), ^{119}In ($T_{1/2} = 2.1$ min)^[5, 6]等, 因此发展了一门基于在线同位素分离技术的穆斯堡尔谱学。它通过加速器以离子注入、反冲注入^[7]等方法, 将具有短寿命的穆斯堡尔母核注入到需要研究的材料中, 测量其穆斯堡尔谱, 以研究经过离子注入后材料的微观结构特性。在该谱学中需要一种特殊的探测技术, 以适合于在线穆斯堡尔谱测量的条件。首先计数器的质量要轻, 能由穆斯堡尔谱学驱动器载动; 其次, 计数器的信噪比要足够高, 并适应于高辐射本底的条件。平行板雪崩计数器 (PPAC) 是适合在线穆斯堡尔谱学实验的一种计数器^[8, 9], 它充以一定气压的工作气体、工作电压仅数百伏、具有较大的气体放大倍数、平板间气隙较小、具有较高的电场和容许较高的计数率。这些优点使得该类计数器在其它核物理领域也得到了较大的应用, 比如用于束流的位置探测、粒子定时等领域^[10, 11]。本文描述的 PPAC 用于探测穆斯堡尔核素 γ 射线共振吸收后放出的内转换电子, 其重量仅 40 g, 可方便地安装在穆斯堡尔驱动

器上, 在一定的气压与工作电压下具有稳定的计数率, 其信噪比达到 11, 能有效地测量几十个 nCi 的 ^{119m}Sn 穆斯堡尔谱, 可用于在线穆斯堡尔实验。

2 结构与工作原理

平行板计数器的结构如图 1 所示。壁材料为有机玻璃, 气隙小于或等于 2 mm, 阳极采用胶体石墨墨水剂在阳极平板上涂抹后用金相砂纸打磨光亮、均匀, 阴极采用一片薄铝片, 吸收体材料以微量环氧树脂调匀在铝片上。环氧树脂可以有效地抑制从阴极发射出其它低能电子, 它的使用是提高计数器信噪比的关键。计数器阳极和阴极均为直径为 26 mm 的圆面。计数器入射窗有机玻璃厚 1.5 mm, 它可以保证在内外气体压力以及静电力作用下, 窗口不发生形变, 从而使电极间的电场均匀。

计数器信号引出线直接掩埋于有机玻璃壳体内部, 引线接头分别掩于阳极石墨层与阴极铝片中, 这样可以有效地防止计数器工作过程中引起的不必要的干扰。信号由高压屏蔽电缆线引出, 输入到前置放大器。计数器的阳极接到屏蔽线的阳极, 阴极线接到电缆的屏蔽层。为了防止外界电磁感应信号干扰, 在计数器外壳包裹一层铝箔, 并与计数器阴极引出线共地。计数器的气压采用气压保持瓶保持, 即把计数器与一个约 10 L 的储气钢瓶相连, 以

收稿日期: 2005-09-05; 修改日期: 2005-12-26

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10275033)

作者简介: 黄彦君 (1979-), 男 (汉族), 江西万载人, 博士研究生, 从事穆斯堡尔谱学研究; E-mail: hyj1231@gmail.com

保持气压的稳定。气压采用高精度真空测量仪进行测量。

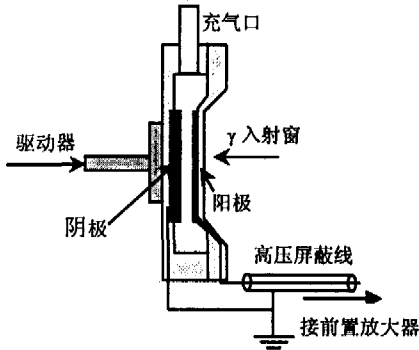


图 1 平行板雪崩计数器结构示意图

计数器的工作气体为高纯的 95% He+10% CH₄。在氦气中添加该比例的甲烷气体，一是作为猝熄气体，另外还可以增加初级电离电子数，从而增大探测效率。气体的雪崩过程可以描述为

$$n(d) = n_0 e^{\alpha d}, \quad (1)$$

其中， α 为第一汤森系数， n_0 为初级电离电子数， d 为电子运动的距离。 α 为约化电场 E/P 的函数，服从汤森公式

$$\frac{\alpha}{P} = A e^{-\frac{B}{E/P}}, \quad (2)$$

P 为工作气体压强， A 和 B 为与气体相关的常数。我们选定的工作气体约化电场约为 15 V/(mm·kPa)。在该约化电场下，计数器能够获得理想的气体放大倍数和合适的计数率。

3 计数器的性能

3.1 计数曲线

我们采用 Ca^{119m}SnO₃ 穆斯堡尔源作实验，活度约为 2 mCi。^{119m}Sn 的穆斯堡尔 γ 射线能量为 23.8 keV，其激发态的内转换电子系数为 5.12，发射的 L 内转换电子相对强度为 83%，能量为 19.6 keV。计数器探测的就是该内转换电子。在计数器内部，经共振吸收后放出的内转换电子是从吸收体材料内部约 2 μ m 处溢出的，其出射的能量是连续的，且出射电子发生的初级电离均匀分布于计数器的有效体积内，而一次雪崩中产生的电子数具有统计涨落，因此计数曲线没有明显的坪^[12]。

3.2 典型的穆斯堡尔谱

测量时，该源置于离 PPAC 约 5 cm 处。图 2 所示为测量的典型穆斯堡尔谱，其中 (a) 为非增丰的 SnO₂ 测量的穆斯堡尔谱，其信噪比也达到了 1.2；(b) 为 ¹¹⁹Sn 增丰 (85%) 的 SnO₂ 的穆斯堡尔谱，其信噪比为 11。二者的中心位移为 0.01 mm/s，相对于 CaSnO₃，采用 α -Fe 进行速度校准，线宽为 0.85 mm/s。这一值接近于理想的 SnO₂ 穆斯堡尔参数值。此外，将 PPAC 安置于穆斯堡尔电磁驱动上测量的谱，谱线宽度没有明显的增加。

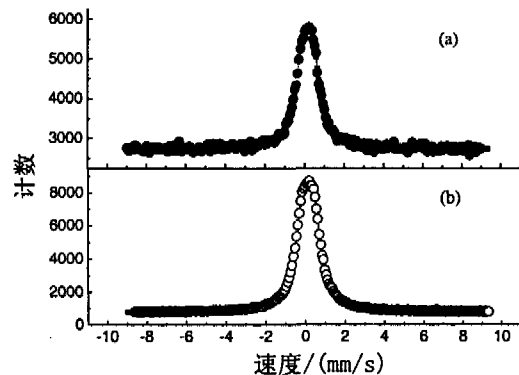


图 2 PPAC 测得的典型的穆斯堡尔谱

3.3 工作气压与电压

图 3 给出了计数器信噪比随脉冲阈值的关系。由图可以看出，在一合适的工作条件下，选择适当的脉冲阈值，对增丰 85% 的 ¹¹⁹SnO₂ 测得的穆斯堡尔谱信噪比均为 11 左右。图 4 给出了计数器临阈电压与截止电压随气压的关系。由图可知，二者均随气压的增大而增大，且气压更大时，工作电压区域更宽，这是由于气压增加时，电子与正离子的复合系数增加的缘故。当电压超过截止电压时，计数器计数率暴涨，可能的原因就是 CH₄ 气体猝熄机制的不完善引起的二次电子发射。内插图表明了临阈电压与截止电压之差即可工作的电压范围以及可达到的最大计数率随气压的关系曲线。由该插图可知，当气压超过 10 kPa 时，计数器的计数率随气压近似为线性关系。这表明可以选择较高一些的气压，以获取大的计数率。

需要注意的是，工作气体的不纯将引起计数器计数率的下降，因此在计数器工作前，应多次充气与抽气，以排出储气瓶、计数器及连接气路中吸附

的负电性气体。整个计数器气路系统需要保持较高的密封性。实验表明，我们制备的 PPAC 在恒温下 1 周内气压增加值不超过 0.25%，能够有效地保持计数率不变。

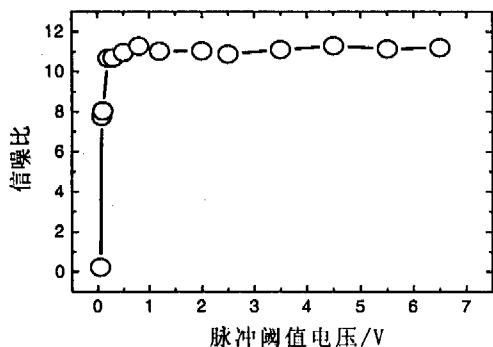


图 3 信噪比随脉冲阈值的关系

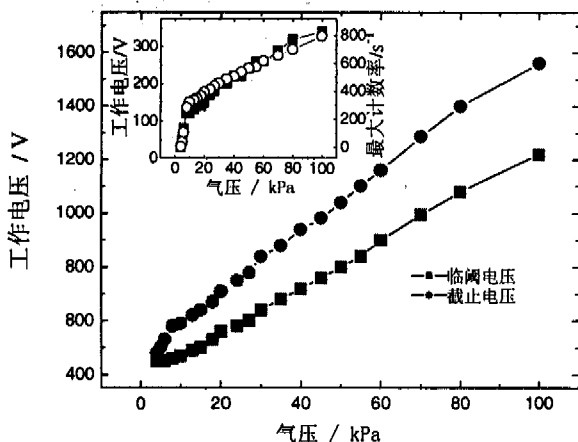


图 4 计数器临界电压与截止电压随气压变化曲线
内插图表示两电压之差(■)以及可达到的最大计数率(○)随气压的关系曲线。

3.4 信噪比

在内转换电子穆斯堡尔谱学中，信噪比可以表示为

$$\epsilon = \frac{N(\nu) - N(\infty)}{N(\infty) + N_{back}} \quad (3)$$

其中， $N(\nu)$ 和 $N(\infty)$ 分别表示共振时与远离共振时测得的计数率。 N_{back} 为没有穆斯堡尔源时的计数。由实验可知，在没有放射性干扰时，约为每分钟 2 个计数。这表明，计数器在工作时的本底主要来源于入射的 γ 射线，即 $N(\infty)$ ，比如射线的光电效应产生的光电子与康普顿散射电子。Weyer 等^[1]估算了穆斯堡尔 γ 射线共振截面与它的光电截面的关系，表明对 SnO_2 发生共振几率是发生光电效应几

率的 450 倍。此外，穆斯堡尔 γ 射线产生的散射 γ 及 X 射线更增大了光电子和康普顿散射电子的发射几率。我们尽量使用质量数小的材料，以减小光电效应及康普顿散射电子。实验表明，在研究材料表面涂覆一层薄的环氧树脂，可以有效的抑制本底。这一措施使我们的 PPAC 的信噪比要高于国内外其他同类型的 PPAC 的信噪比^[5, 8, 10]。

我们采用了约 10 mCi 的 ^{57}Co 源作为干扰源，测量外界的 γ 射线对信噪比的影响。在不同的位置放置该干扰源，得到相应的计数率与谱的信噪比，如图 5 所示。由图可知，计数器的信噪比随着计数率增大而减小，这一关系近似满足公式(3)，表明这些噪声信号来自外界 γ 射线在计数器内部产生的光电子及康普顿散射电子。因此，在计数器工作时，应该尽量避免外界的 γ 辐射，一个解决的办法就是在计数器外面加一个屏蔽装置，以适应具有高辐射本底条件的在线穆斯堡尔实验。

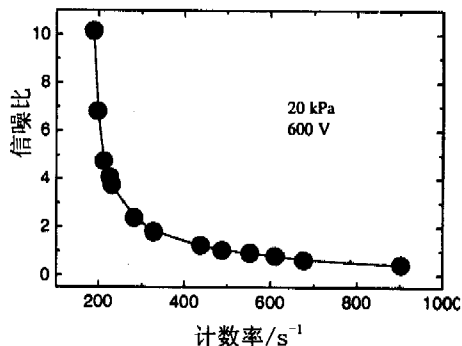


图 5 信噪比随计数率的关系

此外，为了减小 Sn 源的 KX 射线的干扰，须在计数器前放置约 0.1 mm 的 Pd 吸收片。电磁干扰也会极大地影响计数器的本底计数，因此我们在计数器外面包裹一层铝箔，并与计数器阴极共地。这样使得在无外源时的计数率仅 1—2 个/min。

3.5 计数率

在在线穆斯堡尔谱学实验时，由于产生的放射性穆斯堡尔核活度一般很小，为了尽量减小测量的时间，应尽量提高计数器的计数率。

尽管穆斯堡尔 γ 射线能够穿透较深的样品厚度，但是对于内转换电子来说，由于仅在样品极薄的表层才能出射，这样就大大降低了能探测到的内转换电子数。对于我们采用的 2 mCi 的 $^{119\text{m}}\text{Sn}$ 源，在离它仅 5 cm 处，计数率仅 100—500 个/s。由前

面的分析,可以选择适当的工作气压与工作电压,减小源与探测器之间的距离,增加阳极和阴极吸收体的面积,可以有效地提高计数率。

3.6 优化函数

为了得到最佳的信噪比和较高的计数率,需要选择一定的气压与电压。考虑到一个谱的质量与信噪比及计数的统计涨落有关,因此采用评价谱质量的函数 A 来描述,

$$A = \frac{\epsilon}{1/\sqrt{N}} = \epsilon \sqrt{N}, \quad (4)$$

其中, ϵ 为信噪比, N 为计数率。

参 考 文 献:

- [1] Haas H, ISOLDE Collaboration. Nucl Instr and Meth, 1996, **B107**: 349.
- [2] Deicher M, Weyer G, Wichert T H, *et al.* Hyp Int, 2003, **151**(1): 105.
- [3] Haustein P E. Nucl Phys, 1997, **A616**: 469c.
- [4] Weyer G, ISOLDE Collaboration. Hyp Int, 2000, **129**: 371.
- [5] Kobayashi Y, Kubo M K, Yanada Y, *et al.* J Radio and Nucl Chem, 2003, **55**(3): 403.
- [6] Weyer G, Petersen J W, Damgaard S, *et al.* Phys Rev Lett, 1980, **44**: 155.
- [7] Sprouse G D, Kalvius G M. In Mössbauer Effect Methodology, 4. In: Gruverman I J. New York: Plenum Press, 1976.
- [8] Weyer G. In Mössbauer Effect Methodology, 10. In: Gruverman I J. New York: Plenum Press, 1976.
- [9] Saito T, Kobayashi Y, Kubo M K, *et al.* J Radio and Nucl Chem, 2003, **255**(3): 519.
- [10] 胡文祥, 刘联璠, 张桂林. 核技术, 1980, **6**: 13.
- [11] 胡正国, 郭忠言, 詹文龙等. 原子核物理评论, 2004, **21**(1): 17.
- [12] Olson J E. Master's thesis, Investigation of Parallel Plate Avalanche Counters for Use in Electromagnetic and Hadronic Calorimeters. University of Iowa, 2005.

我们制作的计数器由于具有高的信噪比,总计数只要数千,就可以观察到理想的穆斯堡尔谱。从而表明,我们的计数器可以测量弱至几十 nCi 强度的穆斯堡尔源。

4 结束语

由于平行板雪崩计数器仅收集与 γ 共振有关的电子,使得它具有高的信噪比,在我们的实验中最高达到了 11。此外,由于它质量轻小,仅重 40 g,安装制作简易,安装在穆斯堡尔谱仪上不造成谱线展宽,是在线穆斯堡尔实验最有效的一种计数器。

A Parallel Plate Avalanche Counter for Isotope Separator On-line Mössbauer Spectroscopy*

HUANG Yan-jun, LIN Jun, XIA Yuan-fu

(Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: A Parallel Plate Avalanche Counter (PPAC) with weighted about 40 g was developed for isotope separator on-line Mössbauer Spectroscopy. It detects the internal conversion electrons emitted from the resonance Mössbauer nuclide. The signal-to-noise ratio of the spectra reaches 11 for 85% enriched $^{119}\text{SnO}_2$ cathode and absorber. It is an effective detector for on-line Mössbauer experiments. The performance of the counter was discussed in detail.

Key words: on-line Mössbauer spectroscopy; internal conversion electron; parallel plate avalanche counter; signal-to-noise ratio

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10275033)