

文章编号: 1007-4627(2013)03-0369-05

兰州充气谱仪的焦平面探测系统

杨华彬^{1,2}, 郁琳^{1,2}, 黄天衡¹, 张志远¹, 马龙¹,
黄明辉¹, 李广顺¹, 吴晓蕾¹, 甘再国¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在兰州充气谱仪上, 设计安装了一套新的焦平面探测系统, 该系统包括飞行时间 (TOF) 探测器、盒型硅 (Si-box) 探测器阵列和反符合 (Veto) 探测器 3 部分。Si-box 探测器阵列是由 3 块位置灵敏硅探测器 (PSSD) 和 8 块周边硅探测器 (SSD) 构成, 它对注入核的 α 衰变的探测效率达到 80% 左右。Si-box 探测器阵列与 TOF 探测器关联可以有效区分注入信号和 α 衰变信号。Veto 探测器与 Si-box 探测器阵列和 TOF 探测器关联可以反符合掉高能轻粒子对注入信号和 α 衰变信号的干扰。简要介绍了 PSSD 的能量和位置刻度方法。这套探测器系统已经应用于 $^{40}\text{Ca}+^{175}\text{Lu}$ 和 $^{40}\text{Ca}+^{169}\text{Tm}$ 的实验。实验结果表明, 该探测器系统具备很好的本底抑制能力, 能够给出干净的 α 衰变能谱, 结合能量-时间-位置关联测量方法可以实现对单原子的探测和鉴别, 总体上达到了预期的设计要求。

关键词: 焦平面探测系统; 飞行时间; 位置灵敏硅探测; 周边硅探测器; 充气谱仪; 盒形硅探测器阵列

中图分类号: TL817+.6; O571.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.03.369

1 引言

充气谱仪是目前用来合成超重核素的有效装置之一^[1-3], 熔合蒸发反应生成的目标核从薄靶中反冲出来, 反冲核与谱仪中稀薄的气体分子发生碰撞并进行电荷交换, 最终使电荷态达到平衡值。具有平衡电荷态的余核在飞行过程中由于受到电场或磁场的偏转作用而从大量的本底粒子中分离出来, 分离出的目标核被送到低本底区的探测系统进行测量和鉴别。超重核素一般都具有 α 衰变性质, 利用焦平面探测系统对衰变 α 粒子的能量-位置-时间进行关联测量, 可以实现对单个目标核的指认, 因此, 一套精度高、探测效率高和性能稳定的焦平面探测系统对实验显得尤为重要。

目前, 国际上主要的超重核实验室都使用具有相似工作原理和结构的探测系统^[3-4]。这种探测器系统最初是由 GSI 的 SHIP 小组研制的^[5], 主要由 3 部分组

成: (1) 飞行时间探测器 (TOF 探测器), 由一到多个多丝正比室 (MWPC)、微通道板 (MCP) 时间探测装置或平行板雪崩探测器等组成, 主要探测蒸发余核的 TOF 或能损信息; (2) 盒形硅 (Si-box) 探测器阵列, 在阻止产物的一侧采用位置灵敏型硅探测器 (PSSD), 用于记录信号产生的能量和位置信息, 周边硅探测器 (SSD) 用于探测从 PSSD 中逃逸出的 α 粒子或裂变碎片; (3) 反符合探测器 (Veto 探测器), 放置于 Si-box 的后方, 用于反符合掉高能轻粒子对注入信号和 α 衰变信号的干扰。

兰州充气谱仪是目前国内用来合成和研究超重核素的主要实验装置, 焦平面探测系统是其重要组成部分。由于之前的焦平面探测器仅由一块 PSSD 组成, 探测器的灵敏面积小于谱仪焦平面面积的设计值, 造成探测系统存在本底抑制能力不高、探测效率低、不能够区分注入信号和 α 衰变信号等问题。为了使探测系统各方面的性能达到超重核素合成的要求, 我们在

收稿日期: 2012-10-10; 修改日期: 2013-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11120101005, 11005128)

作者简介: 杨华彬(1988-), 男, 河南汝南人, 硕士研究生, 从事实验核物理研究; E-mail: yanghb@impcas.ac.cn.

通信作者: 甘再国, E-mail: zgagan@impcas.ac.cn

<http://www.npr.ac.cn>

兰州充气谱仪上研制了一套与国际上同类探测系统相似结构的焦平面探测系统。本文主要介绍这套新的焦平面探测系统的结构、工作原理和刻度方法,并且给出初步的测试结果。

2 探测系统的结构

兰州充气谱仪的焦平面探测系统与国际上已有的超重核探测系统类似,由 TOF 探测器、Si-box 探测阵列以及 Veto 探测器构成。这 3 部分沿束流方向依次放置于真空收集室中(如图 1),TOF 探测器在 Si-box 前约 30 cm 处,Veto 探测器放置于 Si-box 的后方接近 PSSD。蒸发余核经充气谱仪分离后先穿过 TOF 探测器,然后注入到 Si-box 上的 PSSD 中,注入到 PSSD 中的蒸发余核会发生 α 衰变或裂变,衰变 α 粒子或裂变碎片只能被 Si-box 探测到。由此可知,注入核会在 TOF 探测器和 Si-box 两个探测器上产生信号,而余核的衰变或裂变只会在 Si-box 上产生信号。实验中还会产生一些不容易电离的高能轻粒子。例如,熔合蒸发反应中由复合核退激产生的质子,束流与 He 气发生弹性散射而产生的 α 粒子等。这些粒子一般不会被 TOF 探测器探测到,却可以穿透 PSSD 被 Veto 探测器探测到。

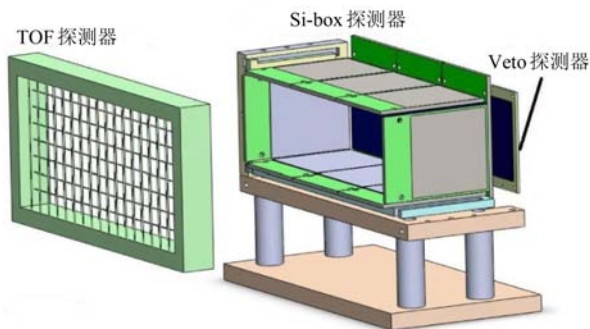


图 1 (在线彩图)兰州充气谱仪焦平面探测系统结构示意图

2.1 TOF 探测器

在该焦平面探测系统中,设计了两类 TOF 探测器: MCP 时间探测系统(如图 2(a) 所示)和 MWPC 探测器(如图 2(b) 所示)。MCP 时间探测装置由 3 部分组成: (1) 竖直放置的 Mylar 膜,当反冲余核穿过它时会激发出次级电子; (2) 位于底面的 MCP 探测器,它是 MCP 时间探测装置的核心器件,一般由两块 MCP 叠加而成,主要功能是放大由 Mylar 膜飞出的次级电子; (3) 与水平方向呈 45° 放置的偏转栅,它是由直

径为 $15 \mu\text{m}$ 的镀金钨丝构成,丝上加有偏转电压。从 Mylar 膜飞出的次级电子受到偏转电场的作用会向下发生偏转,从而打到底面的 MCP 探测器上。次级电子经 MCP 探测器放大后,在正极端得到放大的输出信号。MCP 探测器的时间分辨一般为几百个皮秒量级。不过一般情况下,它要工作在压强为 10^{-4} Pa 以下的真空环境中,这就需把探测器室与谱仪的充气段隔开。



图 2 (在线彩图)MCP 时间探测装置 (a) 和 MWPC (b)

MWPC 的工作气体为异丁烷,气压为 200 Pa。阳极丝和阴极丝是用镀铜的铍丝做成。阳极丝平面位于两个阴极丝平面的中间且与阴极丝平面的间距为 7 mm,阳极丝的丝距为 2 mm。探测器工作时,阳极丝加 400 V 的正偏压,阴极丝加 100 V 的负偏压。入射窗和出射窗由 $0.5 \mu\text{m}$ 厚的 Mylar 膜做成,一侧留有进气口和出气口。探测器灵敏面积为 $80 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ 。与 MCP 时间探测装置相比,它的优点是探测灵敏面积较大,不需要与谱仪的充气段隔离开,同时还可以给出反冲余核在穿过多丝正比室时的能损信号,进行 $\Delta E-E$ 测量。缺点是它的时间分辨不如 MCP 时间探测装置。例如,对于能量为 5 MeV 的 α 粒子,MWPC 的时间分辨在 10 ns 左右。

目前,这两套探测器都已制作完成,正在进行测试中,其中 MWPC 作为 TOF 探测器已经应用于 $^{40}\text{Ca}+^{175}\text{Lu}$ 和 $^{40}\text{Ca}+^{169}\text{Tm}$ 的实验。

2.2 Si-box 探测器阵列和 Veto 探测器

Si-box 探测器阵列由位于焦平面上的 3 块 PSSD 和分布在四周的 8 块 SSD 组成。这些硅探测器由法国的 MICRON 公司生产。PSSD 和 SSD 的灵敏面积均为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, 灵敏层厚度约为 $300\text{ }\mu\text{m}$, 表面死层厚度 $0.2\text{ }\mu\text{m}$, 反向偏压为 20 V 时达到全耗尽。每块 PSSD 的正面被等分成竖直的 16 条, 每条宽约为 3 mm , 单条硅对 α 粒子的能量分辨约为 50 keV , 每条硅的信号读出方式均为双端读出。每块 PSSD 的边框宽约 1.3 mm , 因而相邻 PSSD 之间的死区为 $2.6\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, 3 块 PSSD 并排放置时的灵敏面积约为 $50\text{ mm} \times 150\text{ mm}$, 这与充气谱仪焦平面的设计大小相一致。Veto 探测器用来阻止穿透 TOF 探测器 PSSD 的高能轻粒子, 将 Veto 探测器的输出信号和 TOF 探测器与 PSSD 上输出的信号关联后, 能够很好得减少高能轻粒子的干扰。由于反冲核注入到 PSSD 的深度较浅 ($\sim 10\text{ }\mu\text{m}$), 部分衰变 α 粒子或裂变碎片会从 PSSD 的正面逃逸出来, 逃逸出的 α 粒子或裂变碎片可以被周围的 SSD 探测到。由此可知, Si-box 的探测效率比单块 PSSD 的探测效率高, 模拟结果显示 Si-box 探测器阵列对注入核素的 α 衰变的探测效率为 80%。

3 探测系统的刻度

由于 PSSD 上的每条硅都采用双端读出的方式, 所以总能量信号是两端读出的能量信号之和。根据读出硅条的编号就可以确定信号沿垂直于硅条方向的位置, 再利用电荷分除法对硅条两端读出信号进行处理, 可以确定信号沿硅条方向的位置, 最后可得到在 PSSD 上信号的二维坐标。然而要真正地把电子学读出的信号道数转化成实验数据, 还需要对探测器进行能量和位置的刻度。

对于能量刻度来说, 由于实验中涉及的粒子能量范围较大, CAEN-N568B 型主放大器采用高、低两种放大增益输出: 高增益输出用于测量低能量 ($1 \sim 20\text{ MeV}$) 粒子产生的信号, 如重核的 α 衰变信号; 低增益输出用于测量高能量 ($5 \sim 200\text{ MeV}$) 粒子产生的信号, 如重核注入探测器的信号和重核的裂变信号。两种输出增益的比值固定不变。由于有两种不同增益, 该探测器的刻度方法也分为对低能量粒子的刻度和对

高能粒子的刻度两部分^[6]。对低能粒子刻度时, 采用 ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{212}Bi 和 ^{212}Po 4 个 α 放射源; 对高能粒子刻度时, 由于所需能区高于 α 放射源的能量, 因此需要利用在线实验谱来刻度。下面以对低能粒子的刻度为例进行说明^[7]。

硅条两端读出信号经放大器放大后在模数转换器 (ADC) 中进行模数转换。信号变换后得到的道数分别记为 X_1 和 X_2 , 把与道数对应的能量分别记为 E_1 和 E_2 , 能量与道数的线性关系为: $E_1 = a_1X_1 + b_1$; $E_2 = a_2X_2 + b_2$ 。 E_1 和 E_2 相加后得到信号的总能量, 总能量与 X_1 和 X_2 的关系为: $X_2 = k_0X_1 + PE + Q$ 。如果衰变 α 粒子的能量一定, 则 X_1 和 X_2 满足线性关系 (如图 3(a) 所示)。通过对数据做线性拟合则可得到拟合参数值, 由线性拟合参数就可以得到能量的线性刻度谱, 但是实验数据并不是严格直线分布, 为了得到更精确的能量分辨, 我们采用坐标变换后的二次曲线拟合的方法对实验数据进行拟合 (如图 3(b) 所示)。

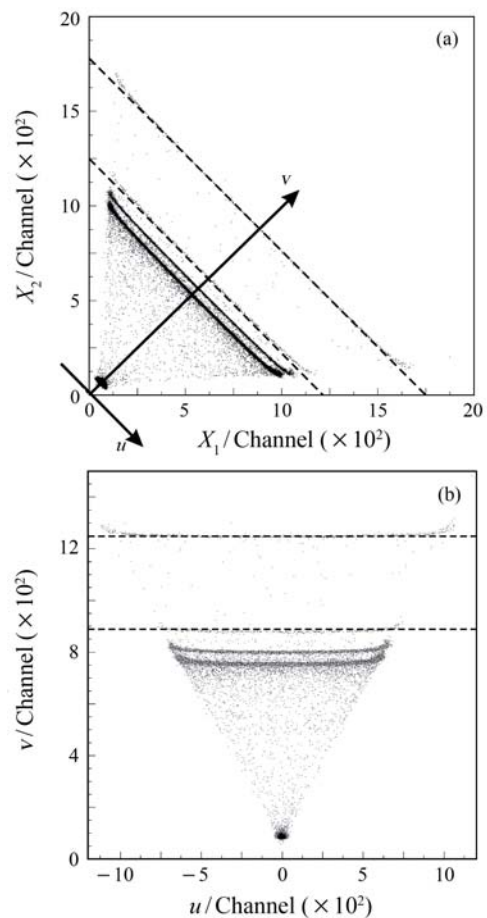


图3 PSSD 条两端读出信号二维谱 (a) 和坐标转换后的二维谱 (b)

最后得拟合曲线为 $E = k\{v - e^{A+Cv}[u - (Mv + N)]^2\} + b$ ^[7], 用该式去拟合在新坐标下的实验数据得到拟合参数 A, C, M, N, k 和 b 的值, 由二次拟合参数就可以得到能量的二次曲线刻度谱。结果显示用二次曲线拟合用比线性拟合得到的能谱图更接近高斯型, 同时还提高了探测器的能量分辨。

在位置刻度过程中, 定义位置参数 $\eta = (Q_1 - Q_2)/(Q_1 + Q_2)$, 其中 Q_1 和 Q_2 分别是硅条两端收集的电荷数。以硅条中心为零点则信号沿硅条方向的位置坐标为 25η mm。但是在实验中用能量信号 E_1 和 E_2 代替电荷就得到 $\eta = [k_0X_1 + X_2 - (b_1 - b_2)/a_2]/[k_0X_1 - X_2 - (b_1 + b_2)/a_2]$ 。结果显示这种方法改善了位置参数的畸变现象^[7]。

MWPC 记录了余核的飞行时间和能损信息, 其时间信息可以直接由电子学读出。由于只需确定 MWPC 的信号有无便可区分硅探测器上的注入和衰变信号, 因此在测量中对 MWPC 的能量分辨要求不高, 但要求对穿透离子的探测效率尽可能大。

4 在线实验测试

最近, 在安装了该焦平面探测系统的兰州充气谱仪上分别进行了 $^{40}\text{Ca} + ^{175}\text{Lu}$, $^{40}\text{Ca} + ^{169}\text{Tm}$ 的实验。目的是为了研究丰质子 Pa 核和 Ac 核附近一些核素的性质, 两次实验的束流能量分别为 5.1 和 4.9 MeV/u。靶的设计分别为 $500 \mu\text{g}/\text{cm}^2(\text{Lu})$, $40 \mu\text{g}/\text{cm}^2(\text{C}) + 500 \mu\text{g}/\text{cm}^2(\text{Tm}) + 10 \mu\text{g}/\text{cm}^2(\text{C})$ 。 $^{40}\text{Ca} + ^{175}\text{Lu}$ 的实验中使用 MWPC 和 Si-box 探测器阵列, $^{40}\text{Ca} + ^{169}\text{Tm}$ 的实验中使用 MWPC、Si-box 探测器阵列和 Veto 探测器。通过这两次实验, 验证了这套探测系统的可行性。对 $^{40}\text{Ca} + ^{169}\text{Tm}$ 的实验数据进行初步分析后得到了如图 4 所示的结果。图 4 (a) 是 PSSD 输出的总能谱信号, 图中的余核注入信号峰和余核 α 衰变信号峰清晰可见。图 4 (b) 是 TOF 和能量的二维关联谱, 由于只需要知道 MWPC 上信号的有无, 因此不必对 TOF 信息详细研究。以上数据均来自于同一个 PSSD 的输出。图形显示探测系统各探测器信号输出稳定、相互关联性较好, 说明了探测器能正常工作。此外, 利用 MWPC 探测器、Veto 探测器和 PSSD 上的信号关联, 可以去除大部分的本底, 并将注入信号与衰变信号区分开来, 得到比较干净的注入核素 α 衰变能谱

<http://www.npr.ac.cn>

图(图 5)。利用 α 衰变的能量信息, 可以对各峰进行初步的指认。

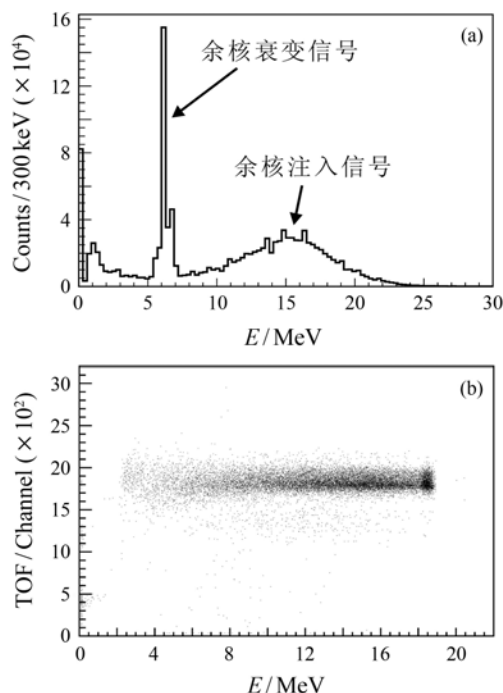


图 4 $^{40}\text{Ca} + ^{169}\text{Tm}$ 实验 PSSD 能谱图 (a) 和飞行时间-能量的二维图 (b)

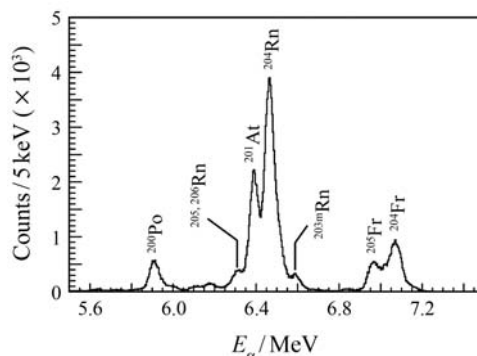


图 5 $^{40}\text{Ca} + ^{169}\text{Tm}$ 实验的 α 衰变能谱

5 结论与展望

新研制的兰州充气谱仪焦平面探测系统, 已经被应用于 $^{40}\text{Ca} + ^{175}\text{Lu}$, $^{40}\text{Ca} + ^{169}\text{Tm}$ 实验, 测试实验得到干净的注入核的 α 衰变能谱。Si-box 探测器阵列的设计方案让探测效率增大到近 80%, 整个探测系统的精度和以前相比有明显提高。总之, 测试实验结果表明了新研制的焦平面探测系统达到了预期的目标。今后的改进措施是, 可以通过改进气体探测器的时间分辨或使用 MCP 探测器得到更加准确的注入离子的 TOF

信息, 进而结合硅探测器上的能量信息来估算注入离子的质量数, 提高粒子鉴别的可信度。在以后的工作中还会不断地改进这套探测系统各方面的性能, 并且希望在这套探测器系统上能够完成更多更有意义的实验, 为开展超重核反应实验做准备。

致谢 作者由衷地感谢兰州重离子研究装置(HIRFL)的工作人员为本文中所涉及的实验提供稳定的 ^{40}Ca 束流。

参考文献(References):

- [1] OGANESSIAN Y. *Acta Physica Polonica B*, 2012, **43**: 167.
- [2] TSYGANOV Y S. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 1999, **25**: 937.
- [3] TSYGANOV Y S, SUBBOTIN V G, POLYAKOV A N, *et al.* *Nuclear Instruments and Methods A*, 2004, **525**: 213.
- [4] HOFMANN S, MÜNZENBERG G. *Reviews of Modern Physics*, 2000, **72**: 733.
- [5] SCHMIDT K H, FAUST W, MÜNZENBERG G, *et al.* *Nuclear Physics A*, 1979, **318**: 253.
- [6] FOLDEN C M. Development of odd-Z-projectile reactions for transactinide element synthesis[D]. USA: University of California, 2004: 56-65.
- [7] JIA Guobin, ZHANG Zhiyuan, HUANG Minghui, *et al.* *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2011, **31**(7): 783.(in Chinese) (贾国斌, 张志远, 黄明辉, 等. *核电子学与探测技术*, 2011, **31**(7): 783.)

Focal Plane Detection System of Gas-filled Recoil Separator in Lanzhou

YANG Huabin^{1, 2}, YU Lin^{1, 2}, HUANG Tianheng¹, ZHANG Zhiyuan¹, MA Long¹, HUANG Minghui¹, LI Guangshun¹, WU Xiaolei¹, GAN Zaiguo¹

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: A new designed focal plane detection system was mounted at the gas-filled recoil separator at Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, which consisted of a time-of-flight (TOF) detector, a silicon-box (Si-box) detector array and a silicon veto detector. Three position sensitive silicon detectors (PSSD) were surrounded by eight side silicon detectors (SSD) without position sensitive, forming a box of the detector open from the front side. The detection efficiency for α -decays of implanted nuclei was about 80%. The anticoincidence condition for the signals from the TOF detector and Si-box detector array was used to distinguish between the pulses originating from the implanted nuclei and their α -decays. The veto detector information was used to discriminate events due to high-energy charged particles. External energy calibration and position calibration of PSSD are described concisely in this work. This system has been used in experiments of $^{40}\text{Ca}+^{175}\text{Lu}$ and $^{40}\text{Ca}+^{169}\text{Tm}$. Clean α -decay spectra obtained in these reactions indicated the detection system has a good performance in background suppression. Evaporation residues can be identified by the energy-time-position correlation method. On the whole, the new designed focal plane detection system has achieved the design requirements.

Key words: focal plane detection system; time-of-flight; position sensitive silicon detector; side silicon detector; gas-filled recoil separator; Si-box detector array

Received date: 10 Oct. 2012; Revised date: 10 May 2013

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11120101005, 11005128)

Corresponding author: GAN Zaiguo, E-mail: zggan@impcas.ac.cn

<http://www.npr.ac.cn>