

文章编号: 1007-4627(2012)01-0072-05

一种用于 RIBLL2 的纵向场多次取样型电离室

唐述文^{1,2}, 段利敏¹, 孙志宇¹, 马朋^{1,2}, 鲁辰桂^{1,2},

杨贺润¹, 张金霞¹, 胡正国¹, 徐瑚珊¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 为兰州第二条放射性束流线(RIBLL2)研制了一台用于 ΔE 测量的纵向场多次取样型电离室。利用 3 组分 α 源(^{239}Pu 为 3.435 MeV, ^{241}Am 为 3.913 MeV, ^{244}Cm 为 4.356 MeV)对取样单元进行了测试, 确定了电离室的最佳工作电压为 -500 V, 沉积能量为 3.435 MeV 时, 取样单元的能量分辨为 271.4 keV(FWHM)。利用 Geant4 对此电离室的整体性能进行了模拟, 表明可以对 $Z \geq 4$ 的离子实现较好的粒子鉴别。

关键词: 电离室; 能量分辨; 粒子鉴别; 模拟

中图分类号: TL811+.1 **文献标志码:** A

1 引言

从 20 世纪 80 年代起, 放射性核束开始被广泛用于研究极端同位旋自由度下核素的结构与性质^[1], 并取得了许多重要成果。这使得放射性核束物理成为目前核物理研究的热门领域之一, 也促进了放射性束产生装置的发展。目前, 世界各大核物理实验室都已先后建立了自己的放射性次级粒子束装置。例如, LISE^[2], A1200/1900^[3], RIPS^[4] 和 FRS^[5] 等。中国科学院近代物理研究所于 1997 年建成并投入运行的第一条放射性次级束流线(RIBLL1)^[6], 可以在较轻质量区提供能量为 20~100 MeV/u 的次级束流, 为国内开展奇异核特别是晕核的结构、性质及反应机制方面的实验研究做出了积极的贡献。伴随兰州重离子研究装置 HIRFL-CSR 工程的竣工, 第二条放射性次级束流线(RIBLL2)^[7] 于 2008 年建成, 可以提供的次级束流的种类和能量都大大提高。

与 RIBLL1 相同, RIBLL2 也是弹核碎裂型次级束流产生装置, 其碎裂产物有多种, 因此在实验中对粒子鉴别就显得尤为重要。 $B\rho$ -TOF- ΔE 法是

目前弹核碎裂型装置中广泛采用的一种碎片鉴别方式, 在确定的磁刚度 $B\rho$ 下, 通过结合产物的飞行时间 TOF 和能损 ΔE 可以实现粒子的完全鉴别。根据 RIBLL2 所选择碎片的不同, 在保持较好能量分辨的前提下, 要求用于能损 ΔE 测量的探测器能够承受较高的计数率, 且有效面积大, 对束流影响小。为此, 我们研制了一种多次取样型纵向场气体电离室(MUSIC)作为 RIBLL2 次级靶前的 ΔE 探测器。

2 探测器的结构及工作原理

气体电离室根据结构可以分为横向场和纵向场两种。所谓横向场是指电场方向和粒子入射方向垂直, 而纵向场则是指电场方向和粒子入射方向平行。就能量分辨而言, 两种类型的电离室相差不大。但就计数率而言, 纵向场电离室由于阴阳极之间的间距可以做得很小, 因此可以拥有更高的计数率。纵向场电离室的结构决定了粒子穿过电极时会损失能量, 因此不太适合入射粒子能量较低的情况。考虑到 RIBLL2 提供的束流能量非常高(一般为几百 MeV/u), 薄电极对束流能量的影响很小, 故设计

收稿日期: 2011-01-19; 修改日期: 2011-07-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(11079044, 10775159); 国家青年基金资助项目(10805060); 中国科学院知识创新工程重大项目(KJCX1-YW-004); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2008CB817702); 国家自然科学基金委员会-中国科学院大科学装置科学研究联合基金资助项目(10979064)

作者简介: 唐述文(1984—), 男, 湖南邵阳人, 在读博士研究生, 从事实验核物理研究; E-mail: tangsw@impcas.ac.cn

成纵向场结构,使探测器能够承受更高的计数率。

整个 MUSIC 由圆筒型外壳、长方体内芯及两个端盖组成(见图 1)。内芯是 MUSIC 探测器的主体部分,其尺寸为 $400\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 。整个内芯由用聚乙烯材料制作的上下底板与左右端板等 4 块板构成,板厚均为 20 mm 。由于 MUSIC 是多次取样型探测器,因此在上下底板的内侧各开有 33 条宽 2 mm 、深 2 mm 和间距为 11.5 mm 的凹槽以放置阴阳极板。其中,阴阳极板采用了 $120\text{ mm} \times 124\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的环氧树脂作为固定板,其两极则采用了 $2\text{ }\mu\text{m}$ 厚、灵敏面积为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的双面镀铝 mylar 膜。实验中,可根据实际需要一定数目的阴阳极板相间插入上下底板的凹槽内,组成取样单元,因此整个 MUSIC 探测器最多可以放置 33 个电极组成 16 个取样单元。MUSIC 外壳为不锈钢材料,其长为 420 mm ,内径为 232 mm ,开有一个进气口和一个出气口,并放置了一块固定的平板用以摆放内芯。MUSIC 端盖为不锈钢材料,其上有 1 个窗、8 个信号接口以及 2 个高压接口,其中,窗为 $7\text{ }\mu\text{m}$ 厚、大小为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的 mylar 膜。

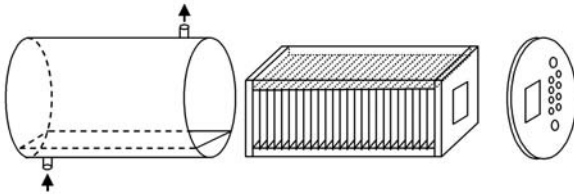


图 1 MUSIC 的结构示意图

从左至右分别为外壳,内芯以及端盖。

利用 Ansoft Maxwell 有限元分析软件,模拟了阴极电压为 -500 V 、阳极及探测器外壳电压为 0 时的电场分布(见图 2)。可以看出,只有在阴阳极板的外边框附近 10 mm 区域内,电场有些不均匀,在距离电极较远的区域,最低只有 $1 \times 10^4\text{ V/m}$,而在电极附近最高可达 $5 \times 10^4\text{ V/m}$ 。在整个 MUSIC 中心 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的灵敏区域内,电场均匀性非常好,均在 $4 \times 10^4\text{ V/m}$ 。

假设当粒子穿过 MUSIC 时,共有 N 个取样单元电离室同时对粒子进行取样测量。由于每个取样单元是完全相同的,则 N 个取样单元测得的 ΔE 应具有相同的分布,设其分辨为 σ_0 。根据中心极限定理,可得知测得能谱的分辨 σ 满足如下公式:

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{\sqrt{N}} \quad (1)$$

由式(1)易知, N 越大分辨越好。因此实际工作中,在保证信号幅度合适的前提下应当尽量多地进行取样。

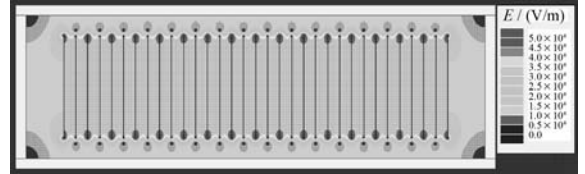


图 2 阴极电压为 -500 V 的 MUSIC 电场分布

实际工作时,可以根据被测粒子在 MUSIC 中的能损大小,对其电极进行不同的配置。当探测较重离子时,由于 dE/dx 较大,较小的取样间距就可以输出足够大的信号幅度,因此可以将 33 块极板全部插上组成 16 个阳极的探测器,以保证最多的取样次数;而探测较轻离子时,由于 dE/dx 较小,为了得到足够大的输出信号幅度,此时可以增大阴阳极之间的间距,使用较少的极板组成 8 阳极甚至 4 阳极的探测器。因此,实际上 MUSIC 相当于 N 个普通平行板气体电离室的串联($N \leq 16$)。

3 探测器的 α 源测试

MUSIC 的电极配置为 17 个阴极和 16 个阳极,每个阳极加上相邻的两个阴极构成一个最小电离室单元,以每两个相邻的最小电离室单元作为一个取样单元,则整个探测器有 16 个最小电离室单元,可以组成 8 个取样单元。

测试过程中,工作气体为 $80\% \text{ Ar} + 20\% \text{ CO}_2$,采用流气工作模式。三组分 α 源贴在 6 mm 厚的光阑上,光阑孔径为 1 mm ,距离 MUSIC 的第一个阴极 1 mm 。阴极加负高压,电荷灵敏前放置于探测器的圆筒内,阳极引出的信号经电荷灵敏前放端盖引出后输入至主放;主放同时引出一路单极脉冲和一路双极脉冲,双极脉冲经过恒分甄别后进入门产生器,产生的逻辑信号作为 ADC 的门信号;单极脉冲经延迟后进入 ADC 的某一通道记录幅度信息。

3.1 工作坪曲线

通过改变阴极电压值,可以得到阳极信号幅度随阴极电压变化的曲线,实验结果如图 3 所示。从

图中可以看出,当阴极电压大于 200 V 时,阳极信号的幅度基本不再变化。根据图 3,在实验中,选取阴极工作电压为 -500 V,认为此时探测器能够稳定工作。

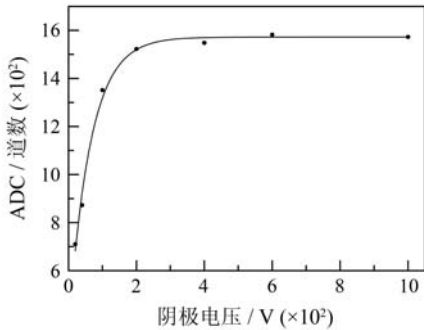


图 3 阳极信号幅度随阴极电压的变化关系

3.2 能量分辨

由于三组分 α 源的能量比较低 (^{239}Pu 为 5.155 MeV, ^{241}Am 为 5.486 MeV, ^{244}Cm 为 5.806 MeV), 利用 LISE 程序计算可知,其全部能量都沉积在一个取样单元中,其中探测器灵敏区内沉积的能量: ^{239}Pu 为 3.435 MeV, ^{241}Am 为 3.913 MeV, ^{244}Cm 为 4.356 MeV。图 4 给出了探测器第一个取

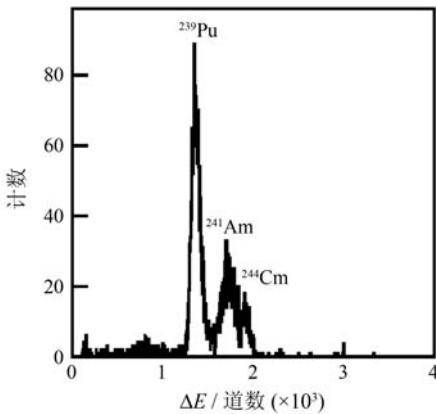


图 4 三组分 α 源的能谱

样单元的能谱。对 ^{239}Pu 的峰进行高斯拟合得到 $\sigma = 46.001$, 峰位道数为 1371.3, 计算得到其相对能量分辨 (FWHM) 为 7.9%, 从而绝对能量分辨为 271.4 keV。

4 探测器粒子鉴别能力的蒙特卡罗模拟

Geant4 是由欧洲核子中心 (CERN) 开发的模拟粒子与物质相互作用的一种面向对象蒙特卡罗软件包^[8]。在探测器开发中,由于其强大的功能可以帮

助节约成本,并大大缩短开发周期,因此得到了广泛的应用^[9-10]。

利用 Geant4 对 MUSIC 探测器的粒子鉴别能力进行了简单的模拟。模拟程序中探测器布局如下:用于探测能损的 MUSIC 探测器放置于真空中,其结构设置与实物完全相同。两个相邻的探测单元的信号并作一个引出,即整个 MUSIC 引出 8 路信号;MUSIC 前放置两块厚度为 25 μm 、相互间距为 8 m 的塑料闪烁体用来探测飞行时间;MUSIC 之后放置一块厚度为 15 cm 的 CsI 晶体用来探测粒子的能量;粒子枪置于第一块塑料闪烁体之前 5 cm 处,可以随机发射质子数从 1 到 30 的各种离子。考虑到 RIBLL2 产生的次级束流的实际能量,将粒子枪发射的离子能量设置为 300 MeV/u,考虑 RIBLL2 的动量发散 $\Delta p/p$ 为 $\pm 1\%$ ^[11],将粒子的能量发散设为 ± 10 MeV/u。根据探测器在束应用时的工作气体选择情况,将电离室的灵敏气体设置为 CF_4 。由于 Geant4 已经计及离子与物质相互作用引起能量沉积的统计涨落,这里简单地把模拟得到的能量沉积的分布与探测器的“固有能量分辨函数”卷积作为真实探测器对 300 MeV/u 的离子响应。其中,我们留有余地地用 271 keV (FWHM) 的高斯分布作为一个取样单元的电离室的“固有分辨函数”。

利用 Geant4 模拟程序计算了发射粒子总数为 10^5 ,所有离子均为自然界同位素中丰度最多元素的裸核情况。MUSIC 的性能结果如图 5 所示。其

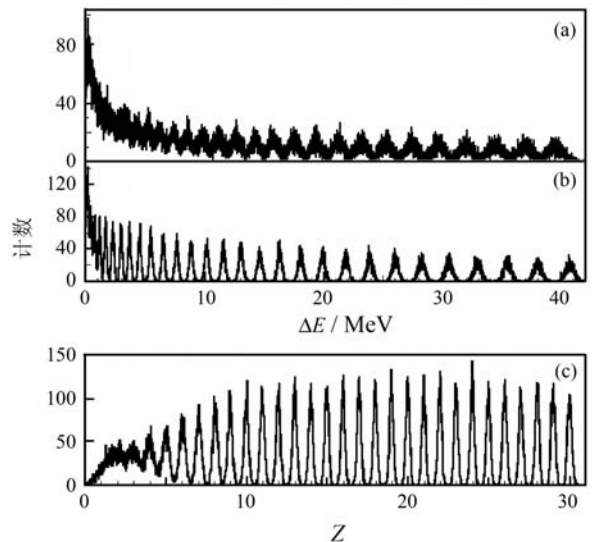


图 5 模拟 MUSIC 对 300 MeV/u 离子的能损谱与电荷谱 (a) 为取样单元的能谱, (b) 为整个探测器的能谱, (c) 为整个探测器的电荷谱。

中,图 5(a)为第 1 个取样单元的能谱,图 5(b)为整个探测器的能谱,由 8 个取样单元的能谱求平均得到,图 5(c)为整个探测器的电荷谱,与能谱的平方根成正比。通过比较图 5(a)和(b)易知,经过多次取样探测后,整个探测器的能量分辨与 1 个取样单元相比有了明显的提高;由图 5(c)可知, MUSIC 探测器可以较好地鉴别 $Z \geq 4$ 的离子。

5 结果与讨论

本文介绍了一套用于 RIBLL2 的纵向场多次取样型电离室 MUSIC, MUSIC 阴阳极之间具有的小间距特点使其能承受更高的计数率,而插片式结构使其具有更强的灵活性,实验中,可以根据实际需要来配置合适的阳极。利用 3 组分 α 源测定了最小电离室单元在不同工作电压下的坪曲线,确定了探测器较好的工作电压为 -500 V。通过测定 -500 V 工作电压下 3 组分 α 源的能谱曲线, ^{238}Pu 的 α 粒子在探测器中沉积能量的能谱显示能量分散 $FWHM = 271$ keV。

对探测器的性能进行了多方面模拟。利用 Maxwell 有限元分析软件模拟了工作电压为 -500 V 时探测器的电场分布,确认了在整个探测器的灵敏区域内电场非常均匀,从而验证了探测器结构的合理性;利用 Geant4 蒙特卡罗软件包模拟了探测器对 $300\text{MeV}/u$ 的多种离子的响应,表明多重取样测量(图 5(b))比单次取样测量(图 5(a))的能量分辨明显提高,利用本探测器可以较好地鉴别 $Z \geq 4$ 的离子。

从初步测试结果和模拟情况来看, MUSIC 具有较长的坪曲线、很好的能量分辨和较高的粒子鉴

别能力。下一步的工作,将对其粒子鉴别能力及计数率能力进行在束测试。

参考文献 (References):

- [1] TANIHATA I, HAMAGAKI H, HASHIMOTO O, *et al.* Phys Rev Lett, 1985, **55**: 2676.
- [2] ANNE R, BAZIN D, MUELLER A C, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1987, **A257**: 215.
- [3] SHERRILL B M, MORRISSEY D A, NOLEN J A, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1991, **B56-57**: 1106.
- [4] KUBO T, ISHIHARA M, INABE N, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1992, **B70**: 309.
- [5] GEISSEL H, ARMBRUSTER P, BEHR K H, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1992, **B70**: 286.
- [6] SUN Z Y, ZHAN W L, GUO Z Y, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2003, **A503**: 496.
- [7] SONG Mingtao, YANG Xiaodong, XIA Jiawen, *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics, 2001, **25**(5): 443 (in Chinese).
(宋明涛, 杨晓东, 夏佳文, 等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(5): 443.)
- [8] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2003, **A506**: 250.
- [9] YUE Ke, XU Hushan, LIANG Jinjie, *et al.* Nuclear Physics Review, 2010, **27**(4): 445 (in Chinese).
(岳珂, 徐珊珊, 梁晋洁, 等. 原子核物理评论, 2010, **27**(4): 445.)
- [10] LI Wenfei, XU Hushan, SUN Zhiyu, *et al.* Nuclear Physics Review, 2004, **21**(4): 309 (in Chinese).
(李文飞, 徐珊珊, 孙志宇, 等. 原子核物理评论, 2004, **21**(4): 309.)
- [11] XIA J W, ZHAN W L, WEI B W, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2002, **A488**: 11.

A Longitudinal Field Multiple Sampling Ionization Chamber for RIBLL2

TANG Shu-wen^{1, 2, 1)}, DUAN Li-min¹, SUN Zhi-yu¹, MA Peng^{1, 2}, LU Chen-gui^{1, 2},
YANG He-run¹, ZHANG Jin-xia¹, HU Zheng-guo¹, XU Hu-shan¹

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

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

Abstract: A longitudinal field Multiple Sampling Ionization Chamber (MUSIC), which makes multiple measurements of energy loss for very high energy heavy ions at RIBLL2, has been constructed and tested with 3 constituent α source (^{239}Pu : 3.435 MeV, ^{241}Am : 3.913 MeV, ^{244}Cm : 4.356 MeV). The voltage plateau curve has been plotted and -500 V is determined as a proper work voltage. The energy resolution is 271.4 keV FWHM for the sampling unit when 3.435 MeV energy deposited. A Geant4 Monte Carlo simulation is made and it indicates the detector can provide unique particle identification for ions $Z \geq 4$.

Key words: ionization chamber; energy resolution; particle identification; simulation

Received date: 19 Jan. 2011; **Revised date:** 27 Jul. 2011

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11079044, 10775159); National Natural Science Foundation of China for Young Scholar(10805060); Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences(KJCX1-YW-004); Major State Basic Research Development Program of China(2008CB817702); National Natural Science Foundation Commission of China-Chinese Academy of Sciences Joint Fund for Research based on Large Scale Scientific Facilities(10979064)

1) E-mail: tangsw@impcas.ac.cn