

大动态范围双维位置灵敏 多叠层探测系统*

王金川 詹文龙 郭忠言 郝鸿飞 周建群
赵有雄 雷怀宏 罗永锋

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1995-03-15 收稿

摘 要

描述了一种用于中能重离子核反应实验研究的大动态范围双维位置灵敏多叠层探测系统。该探测系统由纵向电场气体电离室(IC)、大面积双维位置灵敏穿透型Si探测器(PSSD)、大面积Si光敏二极管(SPD)和用光二极管读出的16单元CsI(Tl)闪烁体探测器阵列组成。用 α 放射源 $^{241}\text{Am}(5.486\text{MeV})$ 测得的IC、PSSD的能量分辨率分别为3%和2.6%。在25MeV/u ^{40}Ar 诱发的核反应中,探测到的 α 粒子的能量动态范围为2—130MeV,此探测系统清楚地分辨出 $Z=2$ 到 $Z=21$ 的元素,对 $Z=18$ 的 Z 分辨本领 $Z/\Delta Z \approx 44.5$,位置分辨为 0.86 ± 0.03 mm (FWHM)。

关键词 粒子鉴别, 纵向电场, 能量分辨, 位置分辨。

1 引 言

中能重离子核反应是近十多年来核物理研究的一个重要领域。在中能区核碰撞中,周边反应、中心反应、热核的形成及伴随轻粒子发射随入射炮弹轰击能量的增加,反应出射道急剧增加和在动量空间中存在较大的动态分布,核反应产物也变得越来越复杂,使得对实验探测技术提出了高的要求,探测器的研制也向更复杂、更精确的方向发展。大动态范围多叠层探测系统具有低的能量探测阈、宽的能量动态范围和好的能量分辨、位置分辨及元素分辨能力^[1],即可用于大量的单举实验中,又可用于出射带电粒子的干涉学研究,还可根据实验的需要,设计成多重探测器阵列的基本构成单元,使所探测的立体角大大增加^[2,3]。为了在HIRFL上开展核反应类弹碎片的相继衰变和粒子干涉学的研究以及放射性束引起的核反应研究,我们发展了一种大动态范围多叠层探测系统。本文报道了此探测系统的结构组成、性能测试和在中能重离子核反应 $^{40}\text{Ar}(25\text{ MeV/u}) + ^{27}\text{Al}$,

* 国家自然科学基金,中国科学院“八五”重大课题资助。

^{58}Ni 、 ^{115}In 等靶的实验测量结果.

2 大动态范围多叠层探测系统的构成和性能测试

大动态范围多叠层探测系统是 HIRFL 大面积位置灵敏电离室终端高性能探测器系统^[4]的重要组成部分. 它由四部分构成: 1) 纵向电场气体电离室(IC), 2) 大面积双维位置灵敏穿透型 Si 探测器(PSSD), 3) 大面积 Si 光敏二极管 (SPD), 4) 16 单元 CsI(Tl) 闪烁体阵列. 图 1(a) 给出了此探测系统的结构简图.

2.1 纵向电场气体电离室(IC)

纵向电场气体电离室由阳极、阴极、栅极三个电极组成, 其电场方向与入射粒子的径迹方向平行, 当作为全阻止型电离室时, 称为 Bragg 曲线谱仪^[5], 可用于低能重离子反应产物的测量. 而在中能区弹核碎裂的反应产物能量很高, 纵向电场气体电离室变为透射型气体电离室, 可代替薄 Si 半导体探测器用作多叠层探测系统的第一级, 降低了

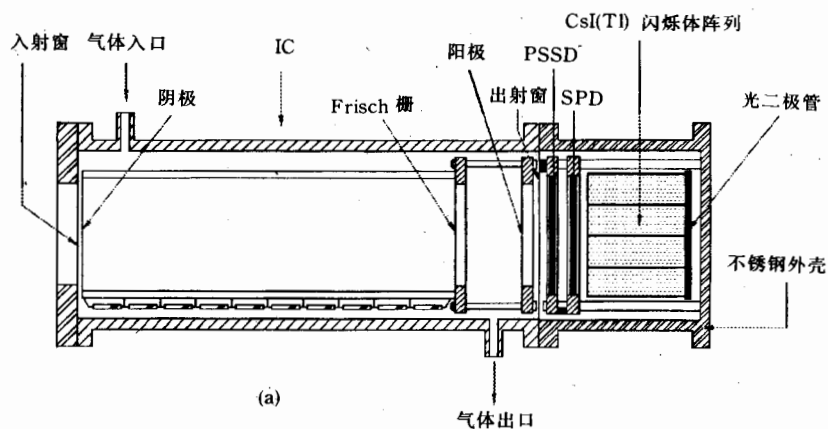


图 1(a) 大动态范围多叠层探测系统结构简图.

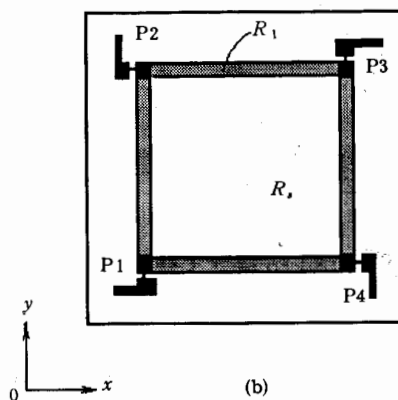


图 1(b) 大面积双维位置灵敏 Si 探测器示意图

整个探测系统的探测阈,提高了整个探测系统的动态范围.

纵向电场气体电离室入射窗、出射窗采用 $6\mu\text{m}$ Mylar 膜, 阴极到 Frisch 栅的距离为 100mm , 栅极到阳极的距离为 10mm . 阴极和 Frisch 栅分别用 $25\mu\text{m}$ 、 $70\mu\text{m}$ 镀金钨丝组成, 间距 1mm , 透射率分别为 97.5% 和 93% . 阳极采用 $1.5\mu\text{m}$ 的镀铝 Mylar 膜, 栅极的屏蔽失效率¹⁶ $\sigma = 2.4\%$. 均压环腔体为印刷电路板环绕胶粘的方形体结构, 均压环宽 2mm , 环间距 7mm . 为了使电场均匀, 均压环之间由 $10\text{M}\Omega$ 电阻连接, 电离室灵敏体积是 $(45 \times 45 \times 110)\text{mm}$, 选用 $\text{P10}(90\%\text{Ar}, 10\%\text{CH}_4)$ 工作气体, 流气式气压由稳压系统自动控制. 当气压充至 48.26kPa , $V_k = -1000\text{V}$, $V_a = 350\text{V}$, Frisch 栅接地时, 对 $^{241}\text{Am}(5.486\text{MeV})$ 测得的能量分辨率 $\sim 3\%$. 纵向电场气体电离室的其它细节见文献[7].

2.2 大面积双维位置灵敏 Si 探测器(PSSD)

大面积双维位置灵敏 Si 探测器(PSSD)是八十年代末国际上发展起来的一种新型 Si 探测器, 它能同时测量入射粒子的位置和能量信息, 具有较好的位置分辨和能量分辨率. 我们采用的 PSSD 的灵敏面积为 $(45 \times 45)\text{mm}$, 厚度为 $400\mu\text{m}$, 型号是 Hamamatsu 公司生产的 3S3064, 如图 1(b) 所示, 基体材料为离子注入的 n 型硅, 硼离子注入层形成一个表面电阻为 R_s 的信号阳极进行电荷分配和形成 p-n 结, 其周围附有四根离子注入法形成的电阻为 R_i 的线电阻条, 由四个角的铝层接点 P1、P2、P3、P4 读出位置信号, 能量信号由背面的金层得到. 全耗尽工作偏压 $V_{\text{bias}} = 100\text{V}$. 当能量路主放成形时间常数取 $2\mu\text{s}$ 时, 用 α 放射源 $^{241}\text{Am}(5.486\text{MeV})$ 测得的能量分辨率为 2.6% .

设 PSSD 的边长为 L , 入射到 PSSD 表面的粒子位置坐标是 x, y (取 P1 为坐标原点), 电离产生的总电荷用 Q_0 表示, 四个角接点收集到的电荷分别为 $Q_{P1}, Q_{P2}, Q_{P3}, Q_{P4}$, 由电荷分配定律得:

$$\begin{cases} Q_0 = Q_{P1} + Q_{P2} + Q_{P3} + Q_{P4}, \\ Q_{P1} = \frac{Q_0}{L^2} (L-x)(L-y), \quad Q_{P2} = \frac{Q_0}{L^2} (L-x)y, \\ Q_{P3} = \frac{Q_0}{L^2} x \cdot y, \quad Q_{P4} = \frac{Q_0}{L^2} x(L-y). \end{cases} \quad (1)$$

从(1)式可得到入射粒子的两维位置信号分别为

$$\begin{cases} X/L = Q_{P3} / (Q_{P2} + Q_{P3}) = Q_{P4} / (Q_{P1} + Q_{P4}), \\ Y/L = Q_{P2} / (Q_{P1} + Q_{P2}) = Q_{P3} / (Q_{P3} + Q_{P4}). \end{cases} \quad (2)$$

当位置路主放成形时间常数取 $1\mu\text{s}$ 时, 用 α 放射源 $^{241}\text{Am}(5.486\text{MeV})$ 测得的位置分辨 (FWHM) 约为 1.9mm .

2.3 大面积 Si 光敏二极管 (SPD) 和 16 单元 CsI(Tl) 闪烁体探测器阵列

大面积 Si 光敏二极管 (SPD) 是 Hamamatsu 公司的 4S1467 型, 灵敏面积为 $(48 \times 48)\text{mm}$, 厚度为 $300\mu\text{m}$, 全耗尽工作偏压 $V_{\text{bias}} = 80\text{V}$, 该探测器在这里作为第三级 ΔE 探测器使用. 16 单元闪烁体探测器阵列组成一个 4×4 的方形结构, 每块 CsI(Tl) 晶体的几何尺寸为 $(10 \times 10 \times 20)\text{mm}$, 其前后表面经过抛光处理, 侧面用若干层 0.1mm Teflon 带包

装,前表面覆盖有 $1.5\mu\text{m}$ 镀铝Mylar膜,后表面和光二极管(Hamamatsu S1790-02)之间通过硅油耦合.此闪烁体探测器阵列作为剩余能量探测器,给出高能带电粒子的有关信息.

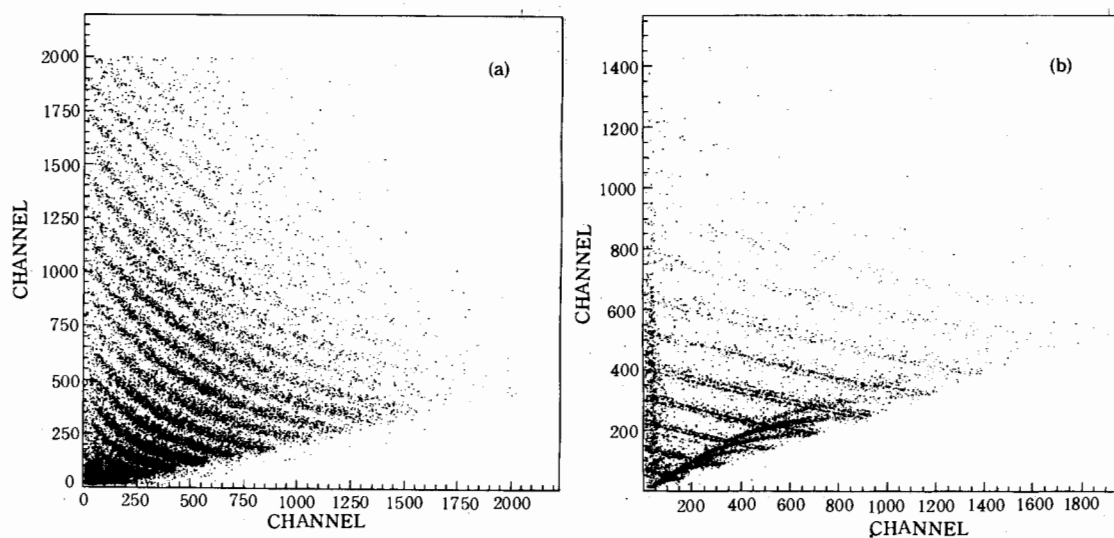
3 中能重离子核反应实验测量结果

3.1 探测器布局及信号处理

我们使用两套多叠层探测器系统在HIFRL上对 25MeV/u ^{40}Ar 轰击不同靶的实验产物做了测量,并进行了出射碎片的相继衰变和粒子干涉学的研究.探测器置于TR4终端真空散射室的转盘上,相对于束流方向探测角为 $\pm 17.5^\circ$,其中IC离靶 30cm ,有效张角 8.6° ,作为 ΔE 的电离室阴极电压 $V_k = -900\text{V}$,阳极电压 $V_a = 300\text{V}$,对应的约化电场 $E/p = 2.48\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1}$,这样使电子的漂移速度最大,达到电子的最佳收集^[6].实验中使用ORTEC公司生产的标准NIM插件处理来自IC、PSSD、PSSD、CsI(Tl)阵列的能量和位置信号,CAMAC的选通信号来自于PSSD的时间信号,用GOOSY在线数据获取系统进行获取,数据以逐个事件方式记录在磁带上,离线处理采用CERN的软件包CERNLIB和PAW进行.

3.2 实验测量结果

图2(a)、(b)、(c)分别为 25MeV/u ^{40}Ar 轰击 $^{115}\text{In}(3.936\text{mg}/\text{cm}^2)$ 靶的IC与PSSD、PSSD与SPD、SPD与CsI(Tl)阵列其中一个单元的关联散布图,对应的线性化后的元素分布图由图2(d)、(e)、(f)给出.从图2可以看出,该探测器系统清楚地分辨出 $Z=2$ 到 $Z=21$ 的元素,其中对Ar的分辨本领 $Z/\Delta Z \sim 44.5$.大部分重反应产物被阻止在IC、PSSD和SPD中,CsI(Tl)阵列给出高能轻带电粒子的剩余能量,离线处理得到的 α 粒子



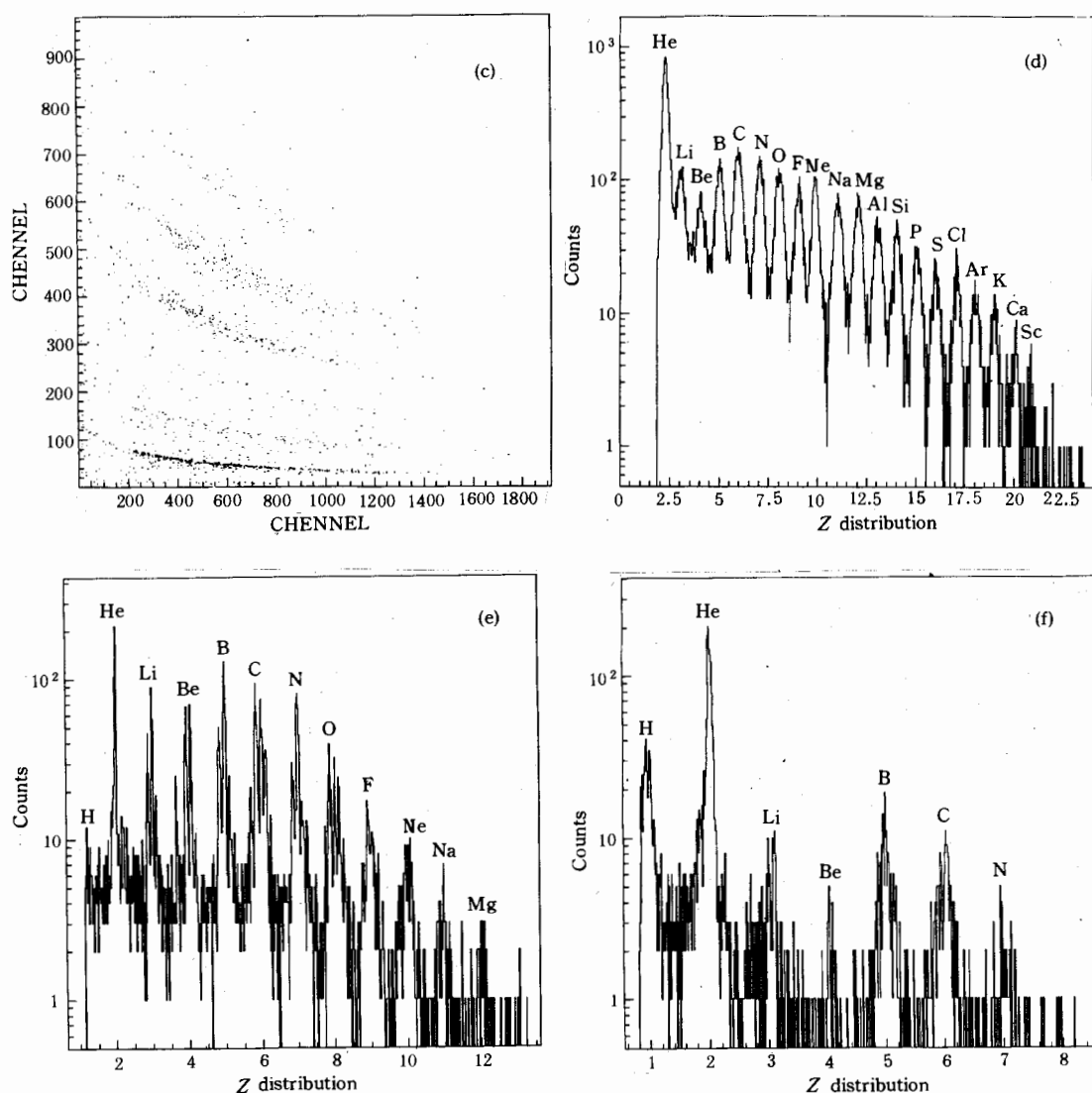


图2 多叠层探测系统在 25MeV/u 的 $^{40}\text{Ar}+^{115}\text{In}$ 反应中的各级关联散布图及线性化后的元素分布图($\theta_{\text{lab}}=17.5^\circ$)

的能量动态范围为 $2\text{--}130\text{MeV}$ 。实验中对 PSSD 的位置分辨进行了在线测量, 测量中 PSSD 前加有一均匀分布 9×9 个针孔的铜薄片, 针孔直径 1mm , 间距 5mm , 位置路放大器成形时间常数取为 $1\mu\text{s}$ 。图 3(a) 给出了 $^{40}\text{Ar}(25\text{MeV/u})+^{27}\text{Al}(1\text{mg/cm}^2)$ 实验中出射粒子的二维位置散布图, 图 3(b) 为 x 方向的某一位置谱, 可以看出, PSSD 具有良好的位置分辨, 计算得到其值为 $(0.86\pm 0.03)\text{mm}$ (FWHM)。

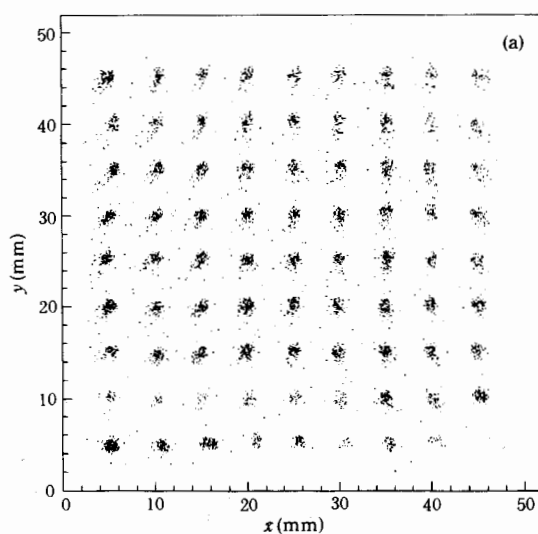


图 3(a) PSSD 测得的 $^{40}\text{Ar}(25\text{MeV}/u) + ^{27}\text{Al}$ 反应中出射粒子的两维位置散布图

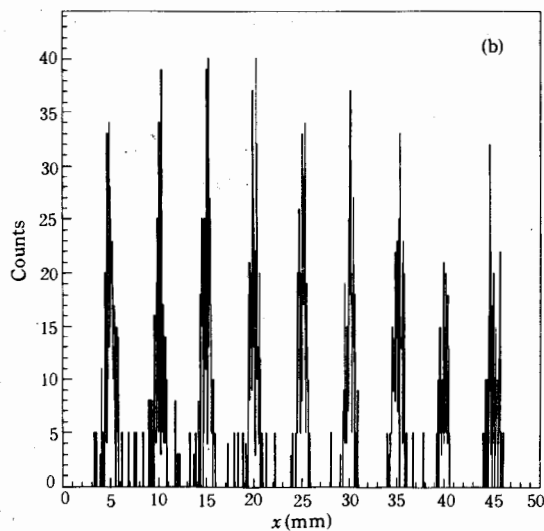


图 3(b) 对应于图 3(a) 的 x 方向的某一位置谱

4 结 论

本文给出了用于重离子反应的大动态范围多叠层探测系统的设计和应用. 此探测系统第一级纵向电场电离室探测介质等效厚度均匀可变, 降低了整个探测系统的能量阈, 提高了整个探测系统的动态范围, 同时由 PSSD+SPD 可得到反应产物较为精确的能量和位置信息, 高能带电粒子的有关信息可由 CsI(Tl) 阵列给出. 该探测系统具有良好的能量分辨、元素分辨和位置分辨, 适合于重离子反应的出射复杂粒子的测量.

经过改进的此探测器系统将作为 HIRFL 上的放射性次级束流线 (RIBLL)^[8] 的多功能、高精度、小探测系统的一部分, 并和其它轻粒子探测器, β 、 γ 射线探测器一起进行 RIB 的核结构、核衰变性质和核谱学的研究.

感谢 HIRFL 的全体人员为本实验提供品质良好的 ^{40}Ar 离子束.

参 考 文 献

- [1] L. Campajola *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth.*, **A342** (1994) 534.
- [2] I. Iori *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth.*, **A325** (1993) 458.
- [3] G. Prete *et al.*, *Nucl. Instr. and meth.*, **A315** (1992) 109.
- [4] 郭忠言等, TR4 终端高性能探测系统, *高能物理与核物理*, **19** (1995) 865.
- [5] C. R. Cruhn *et al.*, *Nucl. Instr. and meth.*, **196** (1982) 33.
- [6] H. W. Fulbright, *Nucl. Instr. and Meth.*, **162** (1979) 21.

- [7] 王金川等, 核电子学与探测技术, 14 (1994) 135.
[8] Zhan Wenlong *et al.*, Radioactive Ion Beams at HIRFL, *Nucl. Phys.*, to be published.

A Two-Dimensional Position Sensitive Multi-Stage Detection System with a Wide Dynamic Range for Heavy Ion Reaction

Wang Jinchuan Zhan Wenlong Guo Zhongyan Xi Hongfei Zhou Jianqun
Zhao Youxiong Lei Huaihong Luo Yongfeng

(*Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

Received 15 March 1995

Abstract

A two-dimensional position sensitive multi-stage detection system with a wide dynamic range for heavy ion reaction has been developed. It consists of four parts: a gas filled axial ionization chamber(IC), a position sensitive silicon detector(PSSD)(45×45) mm, $400 \mu\text{m}$), a large area PIN silicon photodiode(SPD) ((48×48) mm, $300 \mu\text{m}$) and the 16 element CsI(Tl) scintillation detector array. The energy resolutions for IC and PSSD tested with α -source of ^{241}Am (5.486MeV) were 3% and 2.6% respectively. Fragments with Z values from $Z=2$ to $Z=21$ were identified in the reaction of $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$. The Z resolving power was $Z/\Delta Z \approx 44.5(\text{FWHM})$ for $Z=18$. The position resolution of PSSD was $(0.86 \pm 0.03)\text{mm}$ (FWHM). And the energy dynamic range for α particles was about 2—130MeV.

Key words particle identification, longitudinal electric field, energy resolution, position resolution.