

多环型半导体探测器的研制^{*}

颜胜权¹⁾ 郭昭乔 连钢 柳卫平 李志宏
白希祥 曾晟 王宝祥 郭冰

(中国原子能科学研究院核物理研究所 北京 102413)

摘要 为了改进低能次级束逆运动学核反应角分布的测量,研制了空心的多环型半导体探测器,用来取代沿用多年的 X-Y 位置灵敏型半导体探测器.论述了多环型探测器的优越性,介绍了其制作过程和工艺,给出了已研制成功的十一环探测器的性能测试结果.

关键词 低能次级离子束 逆运动学核反应 角分布 多环型半导体探测器

1 引言

HI-13 串列加速器上的次级束流线^[1]主要用于研究⁶He, ⁷Be, ¹¹C 和 ¹⁷F 等不稳定核在质子、氘、³He 和 ⁴He 靶上的反应,特别是天体物理感兴趣的反应.对于入射离子比靶核重的逆运动学两体反应,较重的反应产物集中出射在束流方向的一个角锥中,用面积足够大的二维位置灵敏半导体探测器可实现角分布的完全测量.以前使用日本滨松公司生产的 45mm × 45mm X-Y 位置灵敏型硅探测器^[2]进行全立体角测量.由于实验过程中该探测器既探测反应产物,又探测入射离子,出现了两个比较棘手的问题:一是入射离子束的辐照损伤效应导致其位置响应不断畸变,从而使测量的角分布失真;二是入射离子脉冲的堆积效应严重干扰反应事件的分析^[3].为此,我们研制了空心的多环型半导体探测器,用来取代 X-Y 位置灵敏型半导体探测器.

在测量逆运动学核反应角分布的实验中,要求位置灵敏探测器给出反应产物的能量和出射角度两个关键的实验信息.在确保入射离子束瞄准探测器中心的前提下,采用由同一片半导体上的一系列独立环形单元构成的多环型探测器比采用 X-Y 位置

灵敏型探测器有明显的优越性.

首先,多环型探测器各独立的环形单元所测到反应事件的出射角度是由每单元的平均半径和多环探测器与反应靶的距离从几何上直接确定的;而 X-Y 位置灵敏型探测器须利用 4 路位置信号脉冲幅度的数学运算间接地定出事件的二维坐标,其位置响应因离子辐照损伤或 4 路位置信号的电子学处理、获取及校准过程中的固有偏差而发生程度不同的畸变.其次,当探测器厚度和总有效面积相当时,多环型探测器各单环面积远小于 X-Y 位置灵敏型探测器,前者能量分辨会明显地高于后者能量分辨.如将多环型半导体探测器做成中心有孔的,令其孔径与入射束斑的大小相匹配,则绝大部分入射离子会从孔中穿过,从而可基本消除采用 X-Y 位置灵敏型探测器时发生的脉冲堆积效应和入射离子对探测器的辐照损伤.中心孔丢失的实验信息可通过在多环探测器后另加一个常规的小面积中心探测器得到.当该中心探测器的性能因入射离子的辐照损伤效应而蜕变时,可以直接更换,不影响环形探测器的性能.

综上所述,用空心的多环型探测器取代 X-Y 位置灵敏型探测器可以显著改善低能次级离子束引起的逆运动学核反应角分布的测量.

2004-08-20 收稿,2004-12-06 收修改稿

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目(G200077400, 2003CB716704)和国家自然科学基金(10025524, 10375096)资助

1) E-mail: panyu@iris.ciae.ac.cn

2 多环型半导体探测器主要工艺

多环型半导体探测器为平面突变结型探测器,其研制中采用了平面工艺和离子注入技术,主要制作工艺过程有:硅片清洗、氧化、光刻、离子注入、蒸铝、刻铝成型及打孔封装等,如图 1 所示.

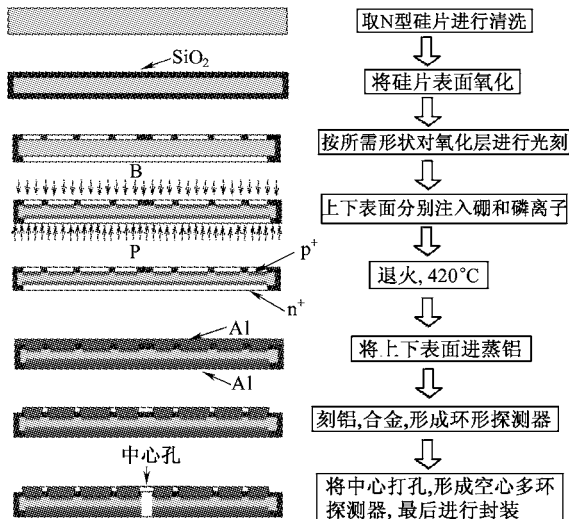


图 1 环状半导体探测器主要工艺步骤
该图为多环探测器中心剖面示意图.

上图为有 4 个环的多环型半导体探测器中心剖面示意图,首先将清洗后的硅片进行氧化处理,控制氧化层厚度为 7000\AA 左右;然后将此表面氧化的硅片先进行光刻开窗,再进行离子注入,使开窗处氧化层被去除的上表面接收硼离子并与 N 型半导体硅形成 PN 结,即各环形探测器;未去除氧化层的地方硼离子不能穿过氧化层形成 PN 结,从而作为死区将各环形探测器从同一片硅片上分开.下表面注入磷离子是为了形成一个欧姆接触层以降低接触电阻.离子注入完成后,在氮气的保护下将硅片放入 420°C 环境中进行退火处理.之后,将硅片上下表面蒸铝并将上表面隔离带对应的铝用光刻去除,合金,这样各环相互独立的多环探测器就形成了,最后打孔并封装.

3 十一环半导体探测器结构及几何参数

在不超过硅片大小的前提下,环形探测器各环几何尺寸在制作前可根据具体实验安排进行调整,以更好地满足实验的要求.我们是根据相关实验要

求具体设计的,研制的十一环探测器和外形如图 2 所示,使用的材料是厚度为 $300\mu\text{m}$ 直径为 $\phi 100\text{mm}$ 的 N 型半导体硅片,电阻率为 $12000\Omega\cdot\text{cm}$.

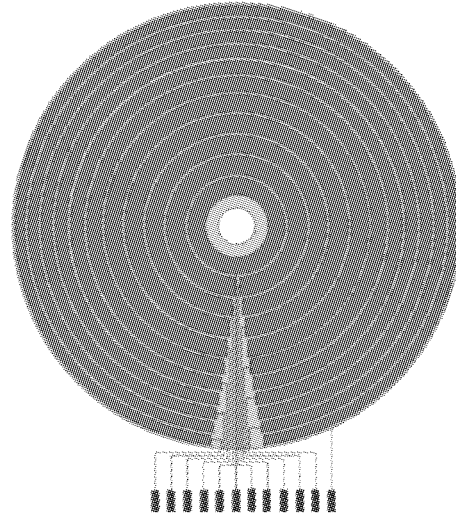


图 2 十一环探测器示意图

表 1 十一环探测器几何参数

	内径/ mm	外径/ mm	缺口长度/ mm	有效面积/ mm^2
中心孔	-	3.50	0	38.48
第 1 环	6.00	9.15	0	149.99
第 2 环	9.75	13.27	1.45	250.17
第 3 环	13.87	17.03	1.85	300.15
第 4 环	17.63	20.99	2.25	400.16
第 5 环	21.59	24.74	2.65	450.15
第 6 环	25.34	28.07	3.05	450.12
第 7 环	28.67	31.11	3.45	450.12
第 8 环	31.71	33.93	3.85	450.10
第 9 环	34.53	36.59	4.25	450.10
第 10 环	37.19	39.10	4.65	449.32
第 11 环	39.70	41.5	5.05	450.09

探测器几何参数如表 1 所示,表中第一环到第十一环分别对应探测器中心往外的一到十一个独立环.包括中心孔在内的前四环主要是考虑孔和各环对应的张角基本相同而设计孔和各环尺寸,从五环到十一环主要是考虑探测器能量分辨,将各环面积控制在 450mm^2 左右给出相应的尺寸,有效面积为各环的环形面积减去缺口面积(为引出电极导线在各环上开的缺口).为了阻止在探测器正常工作时相邻环的灵敏区连通出现 Cross-talk 效应,相邻环与环之间的间距设计为 0.6mm .由于技术限制,环与环之

间的区域和缺口区域为死区,在实验中可以通过有效面积的信息进行修正。

4 十一环探测器的性能

在实际实验条件下用单能 α 源对十一环探测器的各环进行了能量分辨的测量, α 源为 ^{239}Pu 中混有少量的 ^{241}Am 的混合源,置于探测器正前方 200mm 处,探测器各环工作电压均为 30V. 图 3 为第一环测得的能谱图,测得 ^{239}Pu 能量为 5156.6keV 的 α 粒子峰半高宽为 32.0keV,从图中可以比较清楚地分辨出 ^{239}Pu 能量为 5105.6keV 的 α 粒子,在 ^{241}Am α 粒子能谱中也可将能量分别为 5485.6keV, 5442.9keV, 5388.1keV 的 α 粒子分辨开来. 各环分辨率均由 ^{239}Pu 的 5156.6keV 单能 α 给出,测得各环的分辨率和漏电流如表 2,多环空心半导体探测器个别环能量分辨大于 0.65% 主要是由硅片本身缺陷造成的,采用电阻率均匀度好、无位错、过度性元素杂质含量少、微缺陷少等性能较好的区熔单晶硅片可以使能量分辨率较差的环形探测器得到改善. 在图 4 中给出了环形探测器第一环的漏电流坪曲线,工作电压为 30V 时探测器即可达到全耗尽。

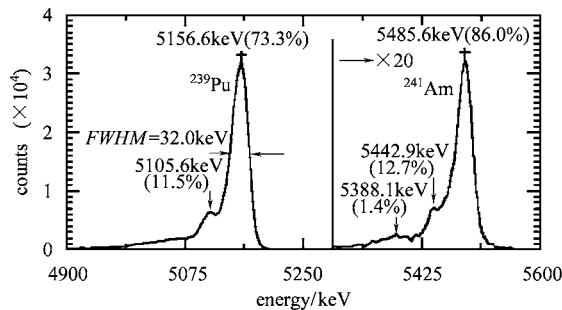


图 3 十一环探测器第一环测得 ^{239}Pu , ^{241}Am 混合 α 源的能谱

以前使用的 X-Y 位置灵敏型硅探测器的能量分辨为 1.75%^[2],多环探测器各单环有效面积要明显小于 X-Y 位置灵敏型硅探测器有效面积,因而多环探测器各环能量分辨率均要明显优于 X-Y 位置灵敏型硅探测器。

多环探测器角度分辨主要由探测器的各环半径和靶与探测器的位置关系决定.若靶置于离多环探测器距离为 L 的中心位置处,从靶上出射的粒子打到内径为 r 外径为 R 的一个环形探测器上,则此时该环形探测器测得粒子实验室系角度为:

$$\theta = \left[\left(\arctg \frac{R}{L} + \arctg \frac{r}{L} \right) / 2 \right] \pm \left[\left(\arctg \frac{R}{L} - \arctg \frac{r}{L} \right) / 2 \right]$$

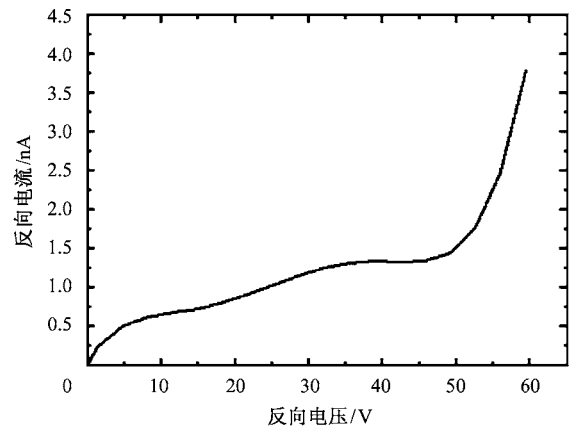


图 4 环形探测器第一环漏电流坪曲线

此角度为该环测得的靶上粒子出射角度的平均角度,若忽略束流角散和束斑大小等因素的影响,该环的实验室系角分辨为 $\left(\arctg \frac{R}{L} - \arctg \frac{r}{L} \right)$ 。

表 2 十一环探测器能量分辨率

环数	分辨率	漏电流/A
第 1 环	0.62%	1.0×10^{-9}
第 2 环	0.62%	1.2×10^{-9}
第 3 环	0.63%	1.8×10^{-9}
第 4 环	0.59%	1.9×10^{-9}
第 5 环	0.60%	7.2×10^{-9}
第 6 环	0.61%	2.4×10^{-9}
第 7 环	0.31%	4.0×10^{-9}
第 8 环	0.58%	2.5×10^{-9}
第 9 环	1.11%	1.7×10^{-7}
第 10 环	1.25%	2.0×10^{-7}
第 11 环	0.64%	6.0×10^{-8}

在 $^{11}\text{C}(d, n)^{12}\text{N}$ 实验^[4]中,利用能量为 63.8MeV 的次级放射性离子 ^{11}C 轰击氘靶,在靶后放置一块厚度为 21.7 μm 的金硅面垒探测器与环形半导体探测器及紧贴在环形探测器中心孔后的厚度为 300 μm 的小面积中心探测器组成一个 $\Delta E-E$ 望远镜系统,几何放置如图 5,本实验中,根据逆运动学原理,感兴趣的粒子 ^{12}N 应该分布在半张角 $\theta < 6.5^\circ$ 的圆锥内,考虑束流角度畸离 ($< 0.8^\circ$) 和束斑大小 ($< 0.6^\circ$) 及散射造成的角度畸变 ($< 0.2^\circ$) 等因素,实际情况下, ^{12}N 分布的立体角 $< 7.52^\circ$,调整靶与多环探测器的距离使得探测器可以覆盖 8.47 $^\circ$ 的立体角,以确保角分布的完全测量.由实验设置利用了第一到第九环和中心小面积探测器给出 $^{11}\text{C}(d, n)^{12}\text{N}$

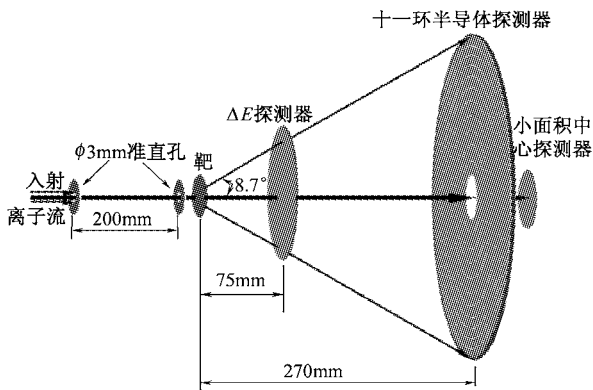
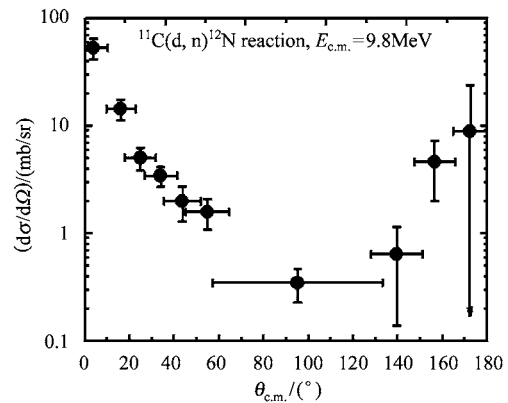


图 5 实验几何设置

截面的 16 个数据, 考虑实验中的束斑, 束流角散, ΔE 造成的角度畸离及能量展宽等因素, 得出的微分截面角分布如图 6.

由于几何设计上避免了探测器正常工作状态下相邻环之间的干扰, 在 $^{11}\text{C}(d, n)^{12}\text{N}$ 实验的数据中, 探测器相邻两环的 Cross-talk 效应小于该相邻的两环上总事件数的百万分之五. 通过 $^{11}\text{C}(d, n)^{12}\text{N}$ 实验可以看出, 采用这种多环探测器不仅能得到更多角度的数据, 而且使各数据点的角度不确定性明显减小, 从而可得到更真实的角分布.

本实验中, 由于探测器采用了中空和各环相互独立的设计, 次级束流绝大部分都打在中心小面积

图 6 $^{11}\text{C}(d, n)^{12}\text{N}$ 反应角分布

探测器上, 使环形探测器上的脉冲堆积效应大幅减少, 环形探测器在实验过程中也没有出现因辐照损伤效应而性能蜕变的现象, 给出了比较理想的角分辨和能量分辨, 较好地达到了我们的实验目的, 得到了较好的实验结果.

5 结论

在位置灵敏半导体探测器中采用多环空心的设计不仅克服了入射离子束的辐照损伤效应, 脉冲的堆积效应, 而且还使能量分辨, 角度分辨得到了较大的改善.

参考文献 (References)

- 1 BAI Xi-Xiang, LIU Wei-Ping, QIN Jiu-Chang et al. Nucl. Phys., 1995, **A588**:273c
- 2 LI An-Li, ZHOU Shu-Hua, LIU Wei-Ping et al. Atomic Energy Science and Technology, 1994, **28**:324 (in Chinese)
- 3 WANG You-Bao, BAI Xi-Xiang, LI Zhi-Chang et al. Atomic Energy Science and Technology, 1999, **33**:199 (in Chinese)
(王友宝, 白希祥, 李志常等. 原子能科学技术, 1999, **33**:199)
- 4 LIU Wei-Ping, LI Zhi-Hong, BAI Xi-Xiang et al. Nuclear Physics, 2003, **A728**: 275—284
(李安利, 周书华, 柳卫平等. 原子能科学技术, 1994, **28**:324)

Development of Multi-ring Semiconductor Detectors

YAN Sheng-Quan¹⁾ GUO Zhao-Qiao LIAN Gang LIU Wei-Ping LI Zhi-Hong

BAI Xi-Xiang ZENG Sheng WANG Bao-Xiang GUO Bing

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract A multi-ring semiconductor detector has been developed for the measurements of the angular distributions of nuclear reactions induced by secondary ion beams in inverse kinematics. The advantages of the multi-ring detector are generally discussed and the manufacturing procedure is presented. The detector has 11 independent rings forming a $\phi 100$ mm silicon wafer with the thickness of $300\mu\text{m}$. A $\phi 7$ mm hole is cut in the center in order to avoid recording the beam at 0° directly. The active area and the energy resolution of each ring are typically 450 mm^2 and 32 keV in *FWHM* (5.156 MeV α particles), respectively. The detector is used in the angular distribution measurement of $^{11}\text{C}(\text{d},\text{n})^{12}\text{N}$ reaction and the performance is briefly described.

Key words low energy secondary ion beams, nuclear reactions in inverse kinematics, angular distribution, multi-ring semiconductor detector

Received 20 August 2004, Revised 6 December 2004

* Supported by Major State Basic Research Development Program(G200077400,2003CB716704) and the National Natural Science Foundation of China (10025524,10375096)

1) E-mail: panyu@iris.ciae.ac.cn