

二维位置灵敏硅探测器的应用研究*

陈陶 李智焕 叶沿林 江栋兴 华辉
李湘庆 葛榆成 王全进 庞丹阳 狄振宇
(北京大学技术物理系, 教育部重离子物理开放实验室 北京 100871)

摘要 对二维位置灵敏硅探测器进行了 ^{239}Pu α 源刻度测试, 并在弹性散射实验中使用了二维位置灵敏硅探测器, 考察了两种定位方法在实验中与测试中的一致性, 测量了二维位置灵敏硅探测器的能量分辨率、位置分辨率和位置畸变, 对位置畸变进行了定性理论解释。

关键词 二维位置灵敏硅探测器 能量分辨率 位置分辨率 位置畸变

1 引言

二维位置灵敏硅探测器(PSSD)^[1-3]具有良好的位置和能量分辨及紧凑的结构, 在核物理实验中得到日益广泛的应用。本文对日本 Hamamatsu Photonics 公司生产的 S5379-02 型 PSSD 进行了 α 源(^{239}Pu) 的测试, 检验了 PSSD 的性能, 研究了影响其性能的因素, 应用 PSSD 进行了放射性核素的弹性散射实验, 考察了两种定位方法在实验中与测试中的存在一致性问题。

2 PSSD 测试和使用

所用 PSSD 是离子注入型硅探测器, 其灵敏面积为 $45\text{mm} \times 45\text{mm}$, 厚度为 $(325 \pm 15)\mu\text{m}$ 。通过将硼离子注入电阻性表面(位置灵敏)形成表面电阻为 R_s 的电阻性阳极和 pn 结, 在其边缘有一圈由附加离子注入形成的、具有较低电阻 R_1 (约为 $2.0\text{k}\Omega$) 的线电阻条。在阳极的 4 个角上的铝层接点读出位置信号, 从探测器背面的金层取出能量信号。全耗尽电压为 80V , 最大可达 100V , 暗电流为 100nA , 全耗尽时电容 C 为 780pF 。

为了对探测器的位置分辨及其线性进行检验, 测试中在 PSSD 前 10mm 处加一厚度为 1mm 的铜准

直器。准直器上有 9×9 准直孔阵列, 准直孔的直径为 0.5mm , 孔的行(列)间距为 5mm , 放射源距准直孔大于 150mm 。探测在真空靶室内进行, 靶室真空度小于 1Pa 。

测试时的电子学线路框架与文献[3]中的图 1 类似。但是电荷灵敏前置放大器采用了自己组装的以美国 AMPTEK 公司^[4]的 A250 芯片为主体的前放, 探测器的 $+80\text{V}$ 偏压通过能量路的前加到探测器背面的电极上, 位置信号路前放的偏压输入端接地。主放大器能量路采用 ORTEC-572, 成形时间常数分别置为 $1, 2, 3, 6$ 或 $10\mu\text{s}$ 几种条件。位置路采用 ORTEC-855, 成形时间常数分别置为 $0.5, 1.5$ 或 $3.0\mu\text{s}$ 几种条件。各路放大器的输出信号输入到 CAMAC 的模数转换插件 AD811。Tigger 信号用能量路主放的双极信号。数据获取使用 GOOSY 系统。

在测试和使用中, 为了降低噪声, 采取了一些方法。在对购买的“裸”探测器进行封装时, 从信号端到插信号线的接线芯的焊线尽可能短。信号路高压通过加在能量路的偏压电阻, 探测器的反向 pn 结电阻(大于 $10^9\Omega$) 和位置路的偏压电阻上形成直流回路, 因此加大偏压电阻为 $100\text{M}\Omega$ 。我们还把前放 test 端的接头与前放输入级的线路焊断, 避免了从 test 接头芯感应的干扰信号作为输入信号送入前放的输入级。此外, 各种电缆引线尽量短; 用来挡次级电子

2002-01-22 收稿

* 国家重点基础发展规划项目基金(G2000077400)和 2000 年教育部优秀青年教师项目资助

的屏蔽薄铝膜与探测器的面要有一定距离,以免其成为感应体等等.通过这些方法,保证了探测器的噪声降到最小.

2001 年在兰州近代物理所的 RIBLL 次级束流线上进行⁶He + ⁷Li(⁹Be)弹性散射的实验.其中用来探测出射粒子的 6 套望远镜就是由 PSSD + Si + CsI 构成.这时放大器的成形时间设为最佳,其中主放能量路的成形时间为 6μs,位置路的成形时间为 0.5μs.图 1 为弹散实验的 PSSD 相对于 CsI 探测器的 ΔE-E 二维谱.其中纵轴的 PSSD 信号作了能量刻度.由图可见噪声甚至和¹H 都分得很清楚.PSSD 上的等效噪声能量平均为 0.17MeV.

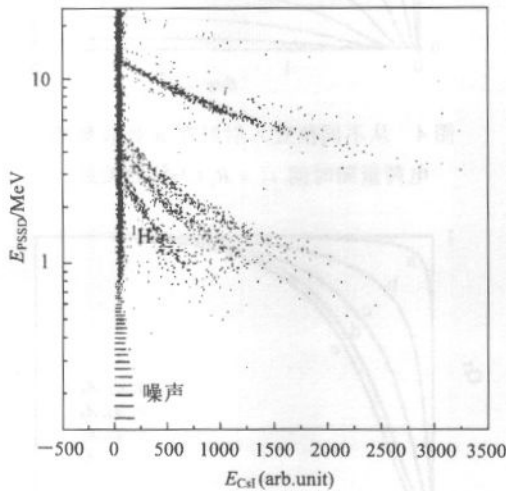


图 1 PSSD 相对于 CsI 探测器的 ΔE-E 二维谱

3 测试结果

用²³⁹Pu α 源做刻度实验时,能量路上的放大器的成形时间 1—3μs 时,由于电荷搜集不全造成能量分辨与成形时间相关,分辨较差.在 6μs 以上,能量分辨达到最佳而且不随成形时间而变化.测得的²³⁹Pu 源的 α 粒子谱中,5.14MeV 的 α 峰的 FWHM 为峰值的 2.4%.

对于二维位置灵敏硅探测器,根据文献[1,2],入射粒子的位置由下式给出:

$$\begin{aligned} x/L &= [(C + D) - (A + B)] / (A + B + C + D), \\ y/L &= [(B + C) - (A + D)] / (A + B + C + D), \end{aligned} \quad (1)$$

其中, L 为探测器边长; A, B, C, D 分别为探测器 4 个位置路的信号的脉冲高度,这是方法一.在一些文献中^[3],也提到用能量输出信号高度 E 作为(1)式的分母,作为方法二.本文将对两种方法加以分析.

用 α 源做刻度测试时,用能量路作开门信号,位

置路的放大器成形时间常数分别设为 0.5, 1.5, 或 3.0μs 几种条件.成形时间常数为 3.0μs 时位置分辨最差,为 0.5μs 时位置分辨最好,对于方法一和方法二结论都成立.

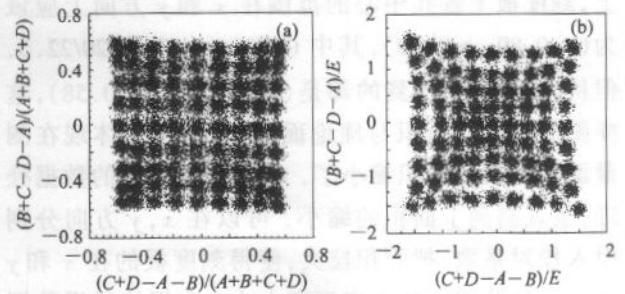


图 2 在²³⁹Pu 的 α 粒子通过准直孔入射时, PSSD 的二维位置分布

用方法一和方法二在放大器成形时间常数为 0.5μs 下得到的图分别如图 2(a), (b).图(a)的平均位置分辨 FWHM 为 3.1mm(点与点的距离为 5mm),图(b)的位置分辨 FWHM 为 2.3mm.图(a)的位置分辨比图(b)的位置分辨略差.这是因为位置路的信号要通过电阻,噪声大,而且 0.5μs 的成形时间各个位置路的信号收集都不全,收集百分比也各不相同,所以采用位置路信号之和作分母(方法一)的位置分辨比用能量信号作分母的略差.

使用 PSSD 是为了得到穿越粒子确实的位置,所以希望能通过刻度数据联系到真实实验中确实的位置.从方法一(图 2(a))可以看到,取值范围在 (-1, 1)之内,如果乘上 L 可以得到确实的位置.对于方法二,在真实实验中能对能量路进行绝对刻度,任一位置路上的信号只是一部分的信号,所以只能对位置路的电子学作相对刻度,无法用源对位置路作绝对刻度.并且位置路和能量路的主放用的成形时间不同,由于位置路的成形时间很短,电荷收集不全,所以即使用 α 源做刻度测试时,都能看出在 E 几乎为单能时, (A + B + C + D)/E 的范围都很大,²³⁹Pu 5.14MeV 的单能 α 粒子的 (A + B + C + D)/E 的范围为从 1.8 到 2.8;真实实验中测量的粒子种类多,能量范围很大,位置路的能量和与能量路的能量值的比值的范围更大.所以第二种方法只是一个相对方法,尽管分辨好,但并不容易直接与实验对照.

从位置线性看,两种方法畸变的形状不同.方法一下点的位置的整体线性比较好,只是中心的点与点之间的间距比周围的略微宽.方法二相反,点的位置的整体线性比较差,明显的看到周边的点的

连线的弧度很大,而且中心的点与点之间的间距比周围的窄很多.

上面的畸变为线性畸变,是相对的关系;还存在一种畸变,本文叫做“绝对面积缩小畸变”.从理论上,刻度板上各孔中心的范围在 x 和 y 方向上应该为 $(-0.89, +0.89)$,其中 $0.89 = x_{\max}/L = 20/22.5$.但从方法一中,得到的却是(约 -0.58 , 约 0.58),这样测出的有效面积与理论面积不符,主要体现在测量面积比理论面积缩小了.在束流实验中的数据处理,也观测到了面积的缩小.可以在 x, y 方向分别引入校对系数,把面积拉大,使得刻度板的在 x 和 y 方向上的范围达到真实面积大小.在用校对系数把面积拉大后,每个孔的测量位置可以用真实的长度单位来代替,而每个孔的理论位置已经由刻度板的加工确定,这样可以通过测量位置与理论位置的差来体现线性畸变的大小.使用各方向上平均位置偏差最小的方法来确定校对系数. α 源刻度测试的校对系数为在 x 方向为 1.53 , y 方向为 1.52 ; x 方向上最小平均位置偏差为 0.6mm , y 方向上最小平均位置偏差为 0.6mm .束流实验中的数据处理使用了校正系数后,真实面积得到恢复.这样的修正对于刻度测试和束流实验大体上一致.

4 理论分析

二维位置灵敏硅探测器的位置畸变与其位置电阻层面产生电荷的传输和搜集是相关的.本文利用文献[5]中提出的 RC 传输模型来分析.

文献[5]中考察了如图 3 所示的不同位置上电荷的传输.图 4 为从不同位置入射时在 A 处收集的电荷量随时间的关系图.从图 4 可以得到结论一:测试位置离搜集点越近,搜集点分配的电荷占总原始电荷的百分比就越大.另外如果每个测试位置在 4 个位置路的电荷总量对最大搜集的电荷总量归一,只观察电荷搜集随时间的关系,如图 5,可以得

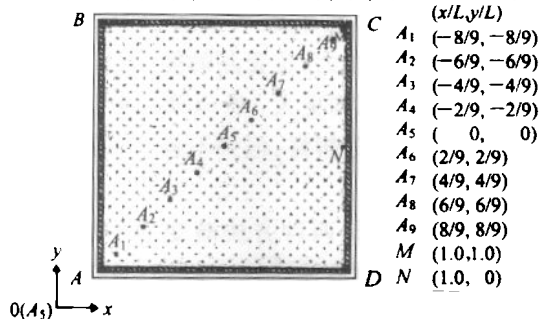


图 3 用于计算的位置点分布图

到结论二:在 PSSD 边缘测试点的电荷传输的上升时间快,中间测试点的电荷传输上升时间慢.

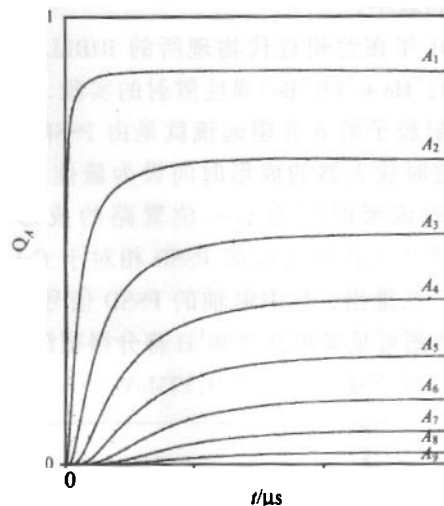


图 4 从不同位置入射时在 A 处收集的电荷量随时间 $t(=R, C/\pi^2)$ 的关系

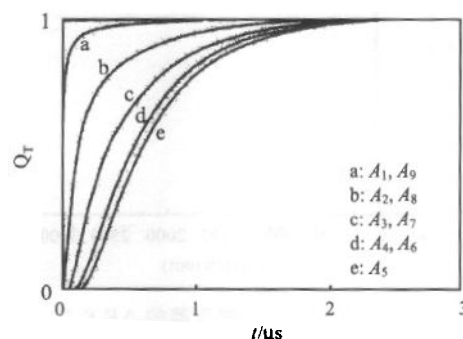


图 5 从不同位置入射时收集的电荷量之和随时间 $t(=R, C/\pi^2)$ 的关系

基于这两个结论,可以对两种不同方法的畸变形状进行解释.

所用 PSSD 的特征时间 $R, C/\pi^2 = 1.58\mu\text{s}$.为了保证分辨率,在位置路放大器的成形时间常数设在 $0.5\mu\text{s}$,与特征时间的比值为 0.32 .这时各位置路的电荷收集不全,而且差别很大,如图 5 的曲线 a 可以收集到最大可搜集电荷总量的 90% 以上,而曲线 e 只能搜集到不到 30% .设 PSSD 的中心为原点,考察一下两个点,如位于 C 处的点 $M(1.0, 1.0)$ 和位于 C 和 D 中间点 $N(1.0, 0)$.对于以给定能量的粒子,测得的 $E_M \approx E_N$,而 N 点因为距离位置路较远,从 C 和 D 收集的电荷就会少于 M 点从 C 和 D 收集的电荷(主要是 D 收集的电荷)少.如果用方法二,则会有 $(C_N + D_N - A_N - B_N)/E_N < (C_M + D_M - A_M - B_M)/E_M$,即 $x_N < x_M$.理论上的 M, N

的 x 坐标时是相同的,但是测量的结果却不再相等,在中间的点 N 相对于在边角的点 M 的 x 值更靠近原点,发生了收缩. 如果从二维来看所有的点,就出现了图 2(b)的畸变形状. 如果用方法一,对于 M 点, C 处分配的电荷占绝对多数,而且上升时间快,则

$$x_M = (C_M + D_M - A_M - B_M) / (C_M + D_M + A_M + B_M) = \\ (1 + D_M/C_M - A_M/C_M - B_M/C_M) / \\ (1 + D_M/C_M + A_M/C_M + B_M/C_M) \approx 1$$

对于 N 点, C 和 D 收集大致相等,远远大于 A 和 B 收集,如果在分子,分母都除以 C 或 D ,

$$x_N = (C_M + D_M - A_M - B_M) / (C_M + D_M + A_M + B_M) = \\ (1 + D_M/C_M - A_M/C_M - B_M/C_M) / \\ (1 + D_M/C_M + A_M/C_M + B_M/C_M) \approx 2/2 = 1$$

所以方法一的线性畸变的形式不同于方法二.

对于“面积缩小畸变”,可以从外部电路找到原因. 前放输入端存在着几十欧姆的等效电阻,探测器位置路的电阻比较低,特别是边电阻. 应用方法一时使用的 A, B, C, D 都经过了等效电阻,受到了影响. 这样理论范围就不只是探测器的灵敏面积,

而应该是包括了等效电阻的大的虚拟面积,探测器的灵敏面积只是其中的一部分. 所以观察到面积缩小的现象. 为了保证对刻度和实验时的一致性,必须使用相同的前放. 而且为了好的线性,每一组最好使用同种前放.

5 总结

本文对 PSSD 进行了测试,研究了影响其性能的工作条件,主要是跟主放的成形时间的关系,并检验了 PSSD 的位置分辨,位置畸变等性能. 并且通过结合真实实验的数据处理需要绝对位置,考察了两种刻度方法与实验的一致性的问题. 最后,从理论上定性的解释了位置畸变产生的原因.

作者在中国科学院近代物理研究所对 PSSD 测试和使用期间,得到靳根明研究员等的热情指导. 李祖玉、张保国、段利敏、王宏伟和肖志刚等对我们的测试工作提供了许多具体帮助. 束流实验是在 RIBLL 束流线上进行的.

参考文献 (References)

- Tadayosh Doko, Jun Kikuchi, Hiromi Yamaguchi et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1987, **A261**:605
- Yanagimachi T, Doko T, Hasebe N et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1989, **A275**:307
- LI A L, ZHOU S H, LIU W P et al. Atomic Energy Science and Technology, 1994, **28**:324 (in Chinese)
(李安利,周书华,柳卫平等. 原子能科学技术, 1994, **28**:324)
- <http://www.amptek.com/>
- Nobuyuki Hasebe, Yasuo Ezawa, Hisashi Yoshii et al. Japanese Journal of Applied Physics, 1988, **27**:816

Study of Two-Dimensional Position Sensitive Silicon Detector

CHEN Tao LI Zhi-Huan YE Yan-Lin JIANG Dong-Xing HUA Hui

LI Xiang-Qing GE Yu-Cheng WANG Quan-Jin PANG Dan-Yang DI Zhen-Yu

(Department of Technical Physics and MOE Key Lab of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract The two-dimensional position sensitive silicon detector has been tested using ^{239}Pu α source and ion beams provided by HIRFL + RIBLL. The operation conditions have been studied carefully for best energy resolution, position resolution and position linearity. Various problems are discussed according to some qualitative analysis.

Key words two-dimensional position sensitive silicon detector, position resolution, energy resolution, position nonlinearity

Received 22 January 2002

* Supported by the Major State Basic Research Development Programme (G2000077400) and 2000 Excellent Young Teacher Program of MOE, P. R. C.