

文章编号: 1007-4627(2017)02-0177-07

## 硅探测器的数字化脉冲形状甄别

李朋杰, 李智焕<sup>†</sup>, 陈志强, 吴鸿毅, 田正阳, 蒋伟, 李晶, 冯骏, 臧宏亮, 刘强, 牛晨阳, 杨彪, 陶龙春, 张允, 孙晓慧, 王翔, 刘洋, 李奇特, 楼建玲, 李湘庆, 华辉, 江栋兴, 叶沿林

(北京大学物理学院, 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 介绍了利用硅探测器的脉冲形状甄别进行粒子鉴别的原理。详细叙述了基于数字化方法的脉冲形状甄别的实现。采样频率和位数是数字化方法的两个重要参数。对于硅探测器信号, 采用 100 MS/s, 12 bit 的 Digitizer 可以满足脉冲形状甄别法对时间分辨的要求。同时对该方法粒子鉴别的特征和能量阈值做了简要的分析和对比。粒子背面入射硅探测器的所得的阈值低于正面入射的情况。例如对于氦周围的同位素, 背面入射情况的阈值约为 100 MeV, 为正面入射情况下鉴别阈值的二分之一, 相当与  $\Delta E$ - $E$  方法中  $\Delta E$  探测器厚度约为 60  $\mu\text{m}$  情况下的阈值。最后定性讨论了硅探测器的电阻率不均匀性和沟道效应对粒子鉴别性能的影响。

**关键词:** 硅探测器; 脉冲形状甄别; 上升时间; 数字化方法; 能量阈值; 电阻率不均匀性; 沟道效应

**中图分类号:** TL67      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.02.177

### 1 引言

在核反应实验研究中, 准确提取反应产物的能量、时间、出射角度以及粒子种类等信息是实验测量的核心问题<sup>[1]</sup>。其中反应产物中带电粒子的鉴别, 也就是确定其质量数  $A$  和核电荷数  $Z$  是实验测量的难点。当前核反应实验研究通常面临反应截面低、反应产物种类多、能量动态范围大等问题。为了适应上述需求, 很多实验室建立了大立体角覆盖, 高空间分辨率(高颗粒度)的望远镜探测阵列。但目前一些关键的实验测量技术, 尤其是低能带电粒子测量问题还没有得到很好的解决: 如核天体物理中很多关键核天体反应测量需要给出能量低于几个 MeV 的轻带电粒子的粒子种类信息。现有的实验技术很难达到上述要求, 因此迫切需要发展新的探测技术。实验上带电粒子的鉴别, 主要利用带电粒子在探测器中能量损失  $dE$  与入射粒子的能量  $E$ 、核电荷数  $Z$  和质量数  $A$  的关系(由 Bethe-Block 公式给出)得到。常用的方法有  $\Delta E$ - $E$  望远镜方法, 脉冲形状甄别(Pulse Shape Discrimination, 简称 PSD)<sup>[2-4]</sup>, TOF 飞行时间法等。

$\Delta E$ - $E$  方法引入两个探测器分别测量入射粒子的  $\Delta E$ (能损)和  $E$  信息, 根据不同种类的粒子在  $\Delta E$

和  $E$  硅探测器中沉积的能量不同, 从而实现粒子鉴别。 $\Delta E$ - $E$  方法的粒子鉴别阈值(即能够实现粒子鉴别所需要的最低的粒子能量)取决于  $\Delta E$  探测器的厚度<sup>[5]</sup>。通过使用更薄的  $\Delta E$  探测器可以进一步降低阈值。如采用厚度为 60  $\mu\text{m}$  的  $\Delta E$  硅探测器, 可鉴别  $\alpha$  和  $^{12}\text{C}$  粒子的最低能量分别为 9.2, 47.4 MeV, 与实际需求相比仍然偏高。由于生产工艺的限制, 硅探测器越薄, 其厚度不均匀性越大, 上述 60  $\mu\text{m}$  的探测器其厚度不均匀性已达到 4%, 导致能量测量精度不能满足实验要求<sup>[5-7]</sup>。所以  $\Delta E$ - $E$  方法在低能带电粒子测量方面受到大的限制, 很难再有提升的空间。

脉冲形状甄别(PSD)方法利用探测器信号的脉冲形状与入射粒子的  $Z$  和  $A$  之间的依赖关系, 提取粒子的种类信息<sup>[2-4]</sup>。脉冲形状甄别方法在闪烁体探测器上有着广泛的应用, 而近年来在硅探测器中的应用成为了研究热点<sup>[8-11]</sup>。该方法可以利用单片硅探测器能量和信号上升时间信息就可以实现粒子鉴别, 能够显著降低粒子鉴别的阈值。硅探测器的脉冲形状甄别研究可以追溯到 1963 年, Ammerlaan 等<sup>[2]</sup>利用锂漂移硅探测器的脉冲形状信息, 实现了  $\alpha$  粒子和氦核的鉴别。但是随后发展很缓慢, 主要原因是模拟电子学难以精确提取脉冲信号的上升时间<sup>[3, 4, 8]</sup>。直到 2000 年 Mutterer 等<sup>[8]</sup>取

收稿日期: 2016-05-29; 修改日期: 2016-06-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11375017)

作者简介: 李朋杰(1991-), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 从事粒子物理与原子核物理研究;

<sup>†</sup> 通信作者: 李智焕, E-mail: zhli@pku.edu.cn。

得突破，利用模拟电子学方法在较大的能量动态范围得到了从 He 到 Si 元素的  $Z$  鉴别，其中也获得从 He 到 O 元素的  $A$  鉴别，显示了脉冲形状甄别法在轻带电粒子鉴别方面的潜力。但由于上述方法的电子学设计复杂、需要优化调节参数众多，使得在大型探测阵列上的应用受到了很大限制<sup>[13, 14]</sup>。

最近几年 FAZIA 合作组 Bardelli<sup>[10, 15-20]</sup>, Carboni<sup>[6]</sup> 等将数字化采样技术 (Digital Sampling Technique) 应用到硅探测器的脉冲形状甄别中，取得了很大的进展，得到了从 H 到 O 元素的  $Z, A$  鉴别<sup>[10]</sup> 以及更重元素的  $Z$  鉴别<sup>[6]</sup>，为该方法在大型带电粒子探测装置中的应用打下了坚实基础。目前几个正在建设的探测器系统例如，GASPARD<sup>[21]</sup>, TRACE<sup>[22]</sup>, HYDE<sup>[23]</sup>, NIMROD<sup>[24]</sup> 和 HIRA<sup>[25]</sup> 都将数字化脉冲形状甄别作为不可或缺的粒子鉴别手段，通过与  $\Delta E-E$  等粒子鉴别方法相结合的方式拓展粒子鉴别的能量范围。

## 2 脉冲形状甄别原理

硅探测器的结构图 1(a) 所示，在探测器的 p-n 结两端外加反向偏压形成全耗尽的灵敏区。其内部电场强度从阴极到阳极线性递减<sup>[25]</sup>，如图 1(a) 所示。假设粒子入射并阻停在硅探测器内。在探测器内部沿着带电粒子入射轨迹电离产生电子-空穴对，其分布密度正比于粒子在该位置的能损，在轨迹末端形成布拉格峰<sup>[1]</sup>。电子和空穴在电场的作用下向相应的电极漂移，并被探测器收集产生信号脉冲。硅探测器输出信号的上升时间正比于电子和空穴的收集时间，主要由漂移运动和等离子体

效应 (The Plasma effect) 两部分贡献。等离子体效应是指大量的电子-空穴对在较小的空间内形成屏蔽电场，削弱探测器内部电场强度，从而延缓载流子漂移。下面以两个粒子 a 和 b ( $E_a = E_b, Z_a > Z_b$ ) 正面入射 (从电场强度高的一侧入射，如图 1(a)) 为例。a 和 b 的能量相同，因此电离产生电子空穴对的总数也相同。根据 Bethe-Block 公式，a 的能量损失率比 b 的大，所以 a 的注入深度更浅，载流子的分布密度更大。由于两者产生载流子漂移的路径差别很大，且等离子体效应程度不同，所以硅探测器输出信号波形也有明显的差异，如图 2 所示。因此载流子的收集时间 (波形的上升时间) 与入射粒子的种类相关。硅探测器中 PSD 方法可以提取带电粒子在硅探测器中沉积的能量  $E$  和信号上升时间 (Risetime)，实现粒子鉴别<sup>[2-11]</sup>。

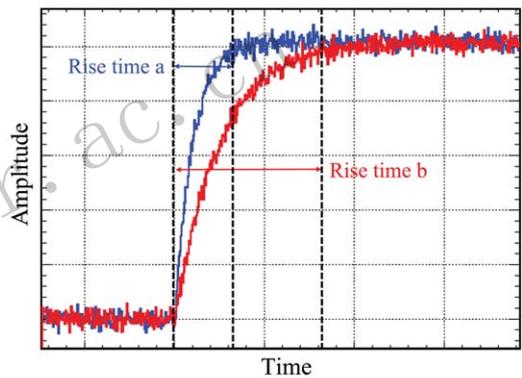


图 2 (在线彩图) 粒子 a 和 b 入射到硅探测器产生的信号

研究表明，相比于正面入射，背面入射 (从电场强度低的一侧入射，如图 1(b)) 更有利于提取脉冲形状中的粒子种类信息<sup>[11]</sup>。原因是背面入射情况下等离子体效应会拓宽硅探测器信号上升时间的变化范围。正面入射和背面入射的区别在于电子空穴对漂移的路径和电场分布，如图 1 所示。以等离子体效应明显的粒子 a 为例，正面入射情况下 a 停阻在高电场区，等离子体表面的载流子容易扩散导致该效应不显著；而背面入射情况下 a 停阻在低电场区，等离子体效应造成的延迟时间变长了，增强了脉冲形状与粒子种类之间的依赖关系。因此背面入射更有利于提高脉冲形状甄别法的粒子鉴别性能。

## 3 数字化脉冲形状甄别

数字化脉冲形状甄别的获取系统流程，如图 3(a) 所示。带电粒子在硅探测器上产生的脉冲信号经过前置放大器处理后，送入波形采样仪 (Digitizer, 或者 Flash ADC)。Digitizer 将输入的模拟信号按照一定的采样间

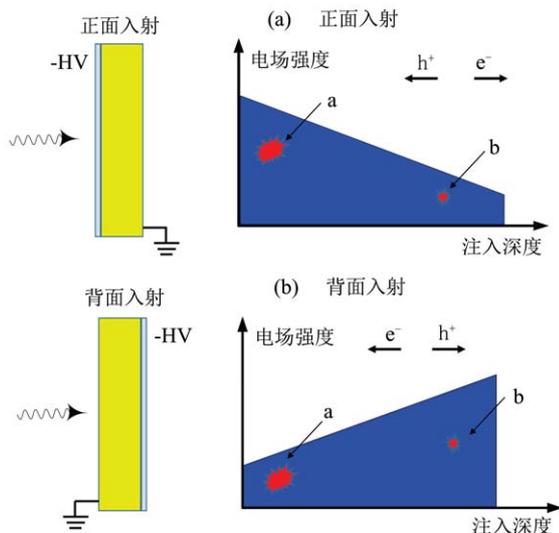


图 1 (在线彩图) 粒子入射硅探测器以及探测器内部电场分布示意图

隔  $t_{clk}$  ( $f_s = 1/t_{clk}$ ,  $f_s$  表示采样频率) 采样。每次采样通过把模拟信号幅值和 Digitizer 内部的  $2^{bits}$  比较器对比并转换成数值, 其数值序列就代表了所要采集的波形, 如图 4 中蓝色的点线。获取的信号波形可在 Digitizer 内部利用数字算法实时进行信号处理, 也可以将波形传到电脑进行离线分析。相比于模拟电子学, 数字化电子学结构简单, 具有很高的灵活性: 可通过数值算法同时进行能量、时间、和脉冲形状相关信息的提取。当前数字化电子学技术在核物理测量方面得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>, 并在很多方面正在逐步取代模拟电子学。

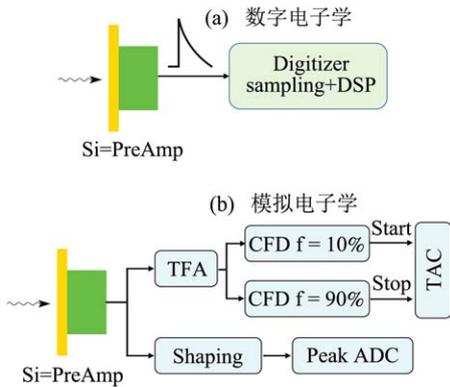


图 3 (在线彩图) 硅探测器脉冲形状甄别的获取系统示意图

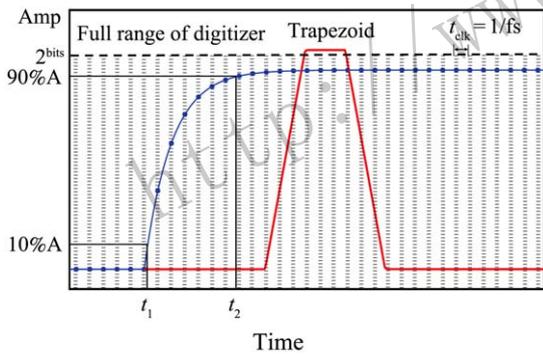


图 4 (在线彩图) 信号采集以及相应数字信号处理: 数字化采样(蓝线); 梯形算法(红线)

硅探测器的脉冲形状甄别是通过能量和上升时间信息得到的。提取数字信号处理中能量信息提取算法常用的有两种: 高斯算法和梯形算法<sup>[17, 27-29]</sup>。梯形算法是当前使用最广泛的算法, 如图 4 中红线所示。前放信号被整形成梯形后在平台位置提取能量信息。该算法可以得到和传统电子学相当的能量分辨<sup>[14, 17]</sup>。

模拟电子学提取信号上升时间的方法比较复杂, 如图 3(b) 所示。前放的输出信号分成两路送入两个 fraction 分别为 10% 和 90% 的恒比定时甄别器 (CFD), 以两路信号时间差作为上升时间。而数字信号上升时间的提取是非常直截了当的。首先由数字信号

得到最大幅值  $A$ , 最大幅值  $A$  的 10%~90% 之间对应的的时间间隔 ( $t_1-t_2$ ) 即为上升时间, 如图 4 所示。由于数字信号是离散数值, 所以采样间隔  $t_{clk}$  决定了  $t_1$  和  $t_2$  的定时精度。为了进一步提高定时精度, 通常在离散的采样点之间采用线性内插或者多次方拟合的方法确定定时时刻。这种方法能够获得远高于  $t_{clk}$  的时间分辨<sup>[16, 30]</sup>。

### 3.1 Digitizer 参数选择

采样频率  $f_s$  和位数 bit (即分辨率) 的选取, 对于准确提取能量和上升时间信息有着重要的影响<sup>[15-19]</sup>。受限于数字电子学技术发展,  $f_s$  和 bit 呈负相关关系。采样频率的增加, 往往是通过损失采样精度才能达到, 所以需要根据信号特征合理选取  $f_s$  和 bit。实际研究中, bit 参数通常用有效位 eff.bit 代替。有效位 eff.bit 是指包含电子学系统误差的位数指标, 一般比 bit 值小 1~2 位<sup>[6]</sup>。

上升时间的误差来源主要有两部分, 一是前放信号噪声, 二是信号在数字化过程丢失的信息。Bardelli 等<sup>[16]</sup>通过数值模拟, 系统地研究了  $f_s$  和 eff.bit 对前放输出信号上升时间分辨的影响, 如图 5 所示。理想情况下 (采样率无穷大, 位数无穷大) 所能达到最好时间分辨如图中曲线 e 所示。上升时间大于 50 ns 时, 8 eff.bit 的 Digitizer, 采样率 1000 MS/s (曲线 b) 和 2000 MS/s (曲线 c), 上升时间分辨相差无几, 随着上升时间变长迅速增加, 而 100 MS/s, 12 eff.bit 的 Digitizer 的时间分辨 (曲线 a) 则几乎无变化, 与理想情况很接近。说明在位数保持不变的情况下单纯增加采样率并不能改善上升时间分辨。但是对于上升时间较小的信号, 时间分辨主要受采样率的影响。假如采样率不能满足在信号的上升阶段不能采集足够多的点, 时间分辨会随上升时间的减小迅速增大, 远远偏离理想情况。实际上硅探测器信号上升时间通常大于几十 ns, 因此采用 100 MS/s,

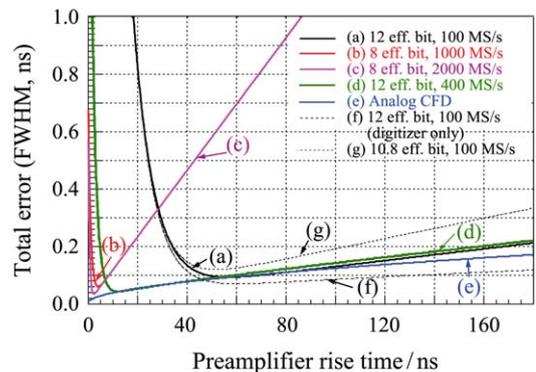


图 5 (在线彩图) 不同的采样率和位数的 digitizer 的定时误差模拟<sup>[16]</sup>

12 bit 的 Digitizer 可以满足硅探测器脉冲形状甄别法对时间分辨的要求<sup>[16]</sup>。

### 4 脉冲形状甄别的一般特征

下面以 2013 年 Neindre 等<sup>[11]</sup>进行了脉冲形状甄别的实验研究为例, 介绍该方法粒子鉴别图的一般特征和鉴别阈值。实验中利用 LNS 束流线提供的 35 A MeV 的 <sup>84</sup>Kr 束轰击 Sn 靶和 Au 靶, 厚度 300 μm(ΔE)和 500 μm(E) 的两个硅探测器测量反应中出射的带电粒子。ΔE 探测器用于脉冲形状甄别, 实验中通过翻转探测器

实现正面和背面入射; ΔE 与 E 探测器组成 ΔE-E 望远镜, 鉴别穿透 ΔE 的粒子种类。探测器的信号利用 12 bit, 100 MS/s 的 Digitizer 获取。实验中给出了单层 ΔE 探测器脉冲形状甄别法的粒子鉴别, 如图 6 所示, 图示结果通过 E 探测器去除了穿过 ΔE 的粒子。图 6(a) 和 (b) 分别表示正面入射和背面入射两种情况, 在能量和上升时间关联图上不同种类的带电粒子会形成不同的带结构。正面入射情况下, 随着入射粒子能量增加, 上升时间也在增加; 而背面入射带结构变化趋势相反。与正面入射相比, 背面入射的信号上升时间的变化范围更大, 带结构分离程度更高。

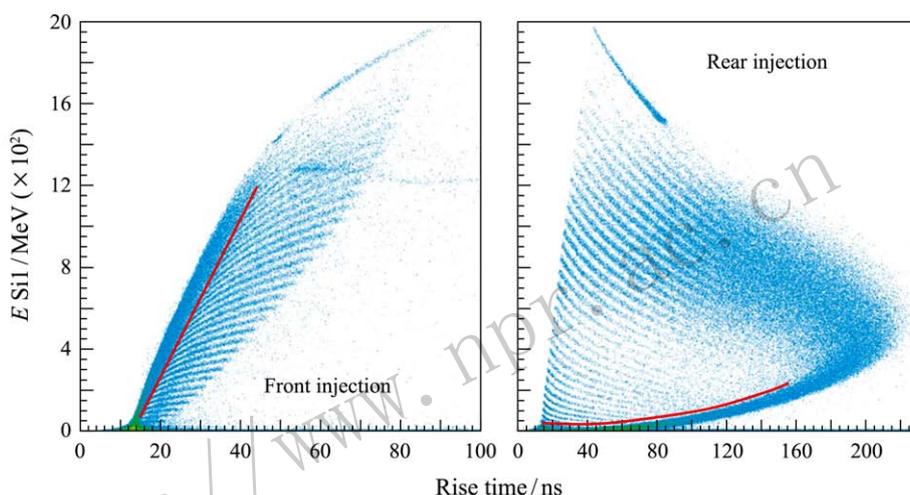


图 6 (在线彩图) 正面入射和背面入射的粒子停阻在单片硅探测中能量与上升时间二维关联图<sup>[11]</sup>

无论哪种入射方式, 随着能量降低不同种类粒子形成的带结构汇集成一条不能鉴别的区域(图 6 中红线), 代表了该种粒子鉴别的能量阈值。图 7 给出了正面和背

面入射情况下不同 Z 的粒子所对应的能量阈值。图中也给出了此实验设置下 ΔE-E 方法鉴别粒子的能量阈值作为参照。从图 7 中可以看出背面入射的阈值要显著低于正面入射。如对于氩周围的同位素, 背面入射情况的阈值约为 100 MeV, 为正面入射情况下鉴别阈值的二分之一, 换算成硅探测器的厚度约为 60 μm。也就是说该方法鉴别粒子的能量阈值与 ΔE 探测器的厚度为 60 μm 的 ΔE-E 方法的能量阈值相当。可见硅探测器的脉冲形状甄别法可以有效降低粒子鉴别能量阈值, 同时避免使用很薄但厚度不均匀性差的硅探测器。

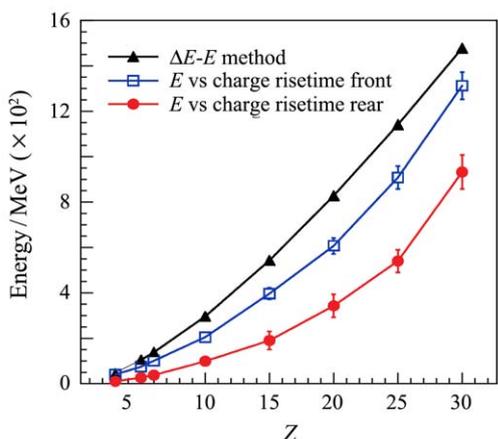


图 7 (在线彩图) ΔE-E法和脉冲形状甄别法(正面入射, 背面入射)的 Z 鉴别能量阈值随核电荷数(原子序数) Z 变化关系<sup>[11]</sup>

### 5 影响硅探测器脉冲形状甄别的因素

研究表明, 前置放大器信号响应和硅探测器的特性对脉冲形状甄别具有决定性作用。在前放的选取上, 要求频带宽、时间响应快; 还要求 RC 电路常数足够大以避免弹道亏损, 使输出信号上升时间能够尽可能准确反映硅探测器中载流子的收集时间<sup>[31]</sup>。下面两小节主要介绍硅探测器电阻率不均匀性和沟道效应对脉冲形状甄

别的影响。

### 5.1 电阻率不均匀性

由于掺杂工艺所限，硅探测器中不同位置的掺杂物的浓度略有差异，导致探测器具有电阻率不均匀性<sup>[19]</sup>，通常在 0.5%~6% 之间<sup>[31]</sup>。该性质能够影响探测器内部电场强度分布和电子和空穴的漂移率，使粒子在探测器的不同的位置所产生信号的上升时间也不尽相同。Bardelli 等<sup>[10]</sup>挑选了 3 块电阻率不均匀性分别为 4.6%，2.1%，0.7% 的硅探测器，研究了电阻率不均匀性对脉冲

形状甄别的影响，如图 8 所示。电阻率不均匀性为 0.7% 的探测器给出的粒子鉴别图中各个元素之间带结构的分离最明显，尤其是在低能端粒子鉴别结果有明显改善。随着电阻率不均匀性的增加，脉冲形状甄别的性能也相应变差，鉴别的能量阈值增加。所以脉冲形状甄别的实验中需通过测试选取电阻率不均匀性低的探测器，或者使用 nTD (neutron Transmutation Doping) 型硅探测器。nTD 型硅探测器以辐照中子与硅原子发生核反应的方式产生杂质原子，电阻率不均匀性非常好<sup>[8, 9]</sup>。

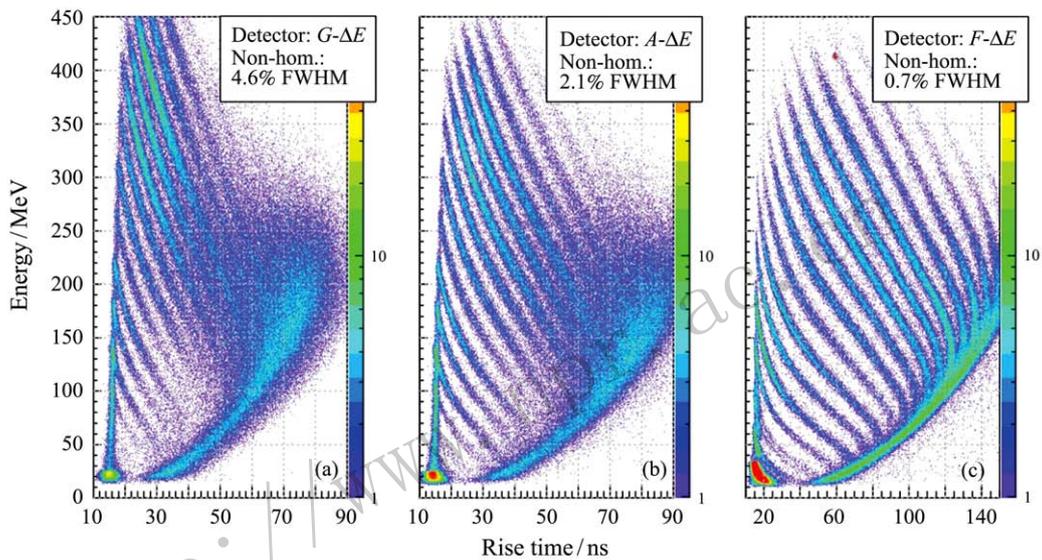


图 8 (在线彩图) 硅探测器电阻率不均匀性(a: 4.6%, b: 2.1%, c: 0.7%)对脉冲形状分析的影响<sup>[10]</sup>

### 5.2 沟道效应

粒子沿着探测器的晶轴或者晶面方向入射时，与硅原子中碰撞的截面变小，产生沟道效应。沟道效应导致能损变小，相应地改变了沿着径迹电离的电子和空穴的

数量和分布。Bardelli 等<sup>[20]</sup>研究了粒子不同方向入射硅探测器对脉冲形状甄别的影响，给出了 408 MeV 的 <sup>82</sup>Se 在金靶上的弹性散射后的能量和上升时间分布，如图 9 所示。实验中通过控制准直孔选取晶轴 <100> 方向、任

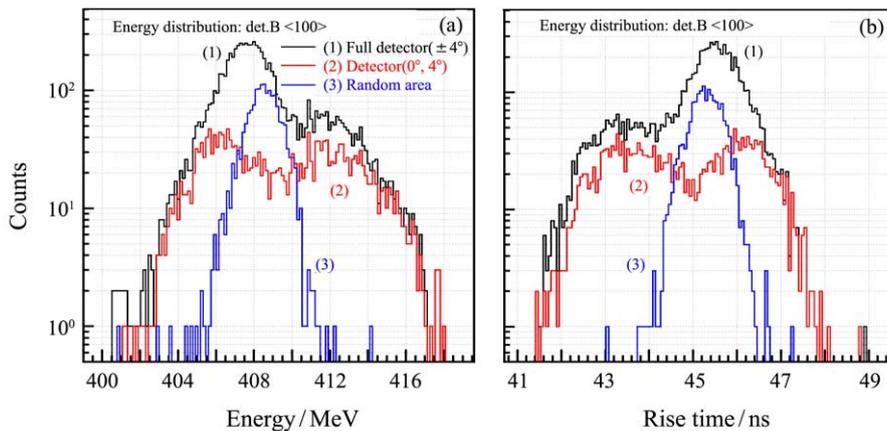


图 9 (在线彩图) <sup>82</sup>Se 在金靶上弹性散射后的能量和上升时间分布 (1) 整个硅探测器; (2) 晶轴方向 <100>; (3) 任意方向<sup>[20]</sup>。

意方向和整个探测器等 3 种设置。晶轴  $\langle 100 \rangle$  方向有沟道效应, 任意方向表示除了晶轴晶面以外沟道效应较弱的方向。图 9 给出了这 3 种设置下的能量和上升时间分布, 可以看出有沟道效应的能量和上升时间的分辨率约为无沟道效应所得到相同测量值的 3 倍<sup>[8, 12, 20]</sup>。

图 10 给出了同一片硅探测器在有沟道效应和无沟道效应情况下粒子鉴别图。对比图 10(a) 和 (b) 结果,

粒子在有沟道效应方向入射只得到了粒子 Z 鉴别; 而在无沟道效应方向入射粒子鉴别能力则有显著的提高, 得到了 C、O 等元素的 A 鉴别。在脉冲形状甄别的实验中为了尽可能避免沟道效应, 改进措施有两种, 一是以避开主要的晶轴晶面方式切割硅片, 二是将硅探测器倾斜一定的角度。

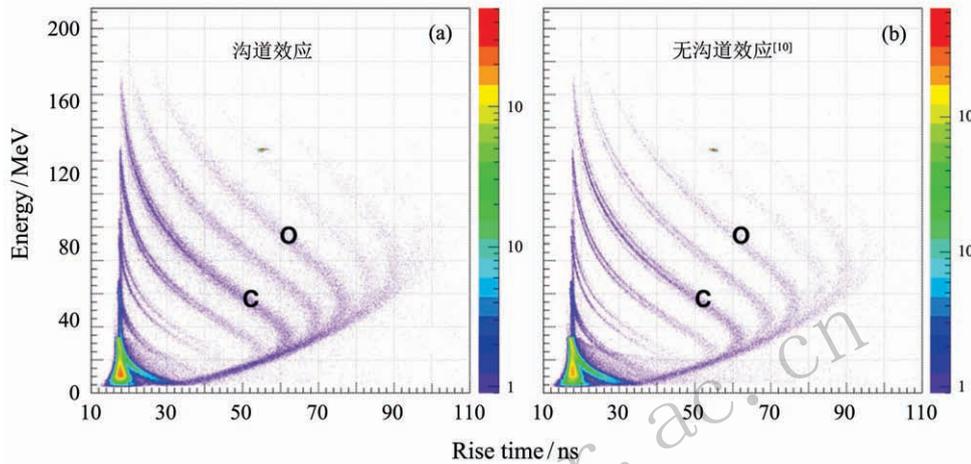


图 10 (在线彩图) 硅探测器中脉冲形状分析法得到能量和上升时间二维关联图

## 6 总结

硅探测器的数字化脉冲形状甄别法是一种很有潜力的新型带电粒子鉴别方法。和传统模拟电子学实现脉冲形状甄别所不同, 数字化脉冲形状甄别法仅需简单的电子学即可实现能量和上升时间等信息的提取。该方法最大的优势是能够鉴别阻停在单片硅探测器上的粒子。当前大型带电粒子探测阵列中该方法作为  $\Delta E-E$  等鉴别方法有效补充, 能够拓展粒子鉴别的能量范围, 显著地降低探测系统的阈值。该方法的应用对于低能核反应产物的测量具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] KNOLL G. Radiation Detection and Measurement[M]. 3rd Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1999: 647.
- [2] AMMERLAAN C, RUMPHORST R F, KOERTS L A C, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 1963, **22**: 189.
- [3] ENGLAND J, FIELD G M, OPHEL T R, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 1989, **280**: 291.
- [4] PAUSCH G, MOSZYLSKI M, WOLSKI D, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 1995, **176**: 365.
- [5] PASQUALI G, PASTORE G, LE NEINDRE N, *et al.* Eur Phys J A, 2014, **50**: 86.
- [6] CABONI S, BARLINI S, BARDELLI L, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2012, **664**: 251.
- [7] VON SCHMID M, EGELHOF P, EREMIN V, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2011, **629**: 197.
- [8] MUTTERER M, TRZASKA W, TYURIN G, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 2000, **47**: 756.
- [9] ALDERIGHI M, ANZALONE A, AUDITOREC L, *et al.* Nuclear Physics A, 2004, **734**: E88.
- [10] BARDELLI L, BINI M, CASINI G, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2011, **654**: 272.
- [11] LE NEINDRE N, BOUGAULT R, BARLINI S, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2013, **701**: 145.
- [12] PAUSH G, MOSZYLSKI M, BOHNE W, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 1997, **44**: 1040.
- [13] BOUGAULT R, POGGI G, BARLINI S, *et al.* Eur Phys J A, 2014, **50**: 47.
- [14] ALDERIGHI M, AMORINI F, ANZALONE A, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 2006, **53**: 279.
- [15] BARDELLI L, BINI M, POGGI G, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2002, **491**: 244.
- [16] BARDELLI L, POGGI G, BINI M, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2004, **521**: 480.
- [17] BARDELLI L, POGGI G, NUCL-EX Collaboration, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2006, **560**: 524.
- [18] BARDELLI L, POGGI G, NUCL-EX Collaboration, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2006, **560**: 517.
- [19] BARDELLI L, POGGI G, PASQUALI G, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2009, **602**: 501.
- [20] BARDELLI L, BINI M, CASINI G, *et al.* Nucl Instr and

- Meth A, 2009, **605**: 353.
- [21] GASPAED Project <<http://gaspard.in2p3.fr/>>.
- [22] TRACE Project <<http://spes.lnl.infn.it/index.php/research-on-nuclear-physics/150-traceS>>.
- [23] HYDE Project <[www.uhu.es/gem/proyectos/hydeS](http://www.uhu.es/gem/proyectos/hydeS)>.
- [24] WUENSCHER S, HAGEL K, WADA R, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2009, **604**: 578.
- [25] WALLACE M, FAMIANO M, VAN GOETHEM M, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2007, **583**: 302.
- [26] SOSIN Z. Nucl Instr and Meth A, 2012, **693**: 170.
- [27] JORDANOV V, KNOLL G. Nucl Instr and Meth A, 1994, **345**: 337.
- [28] STEIN J, SCHEUER F, GAST W, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 1996, **113**: 141.
- [29] NELSON M, ROONEY B, DINWIDDIE D, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2003, **505**: 324.
- [30] HAMRITA H, RAULYA E, BLUMENFELD Y, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2004, **531**: 607.
- [31] DUENAS J, MENGONI D, PARKAR V, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2012, **676**: 70.

## Digital Pulse Shape Discrimination for Silicon Detector

LI Pengjie, LI Zhihuan<sup>†</sup>, CHEN Zhiqiang, WU Hongyi, TIAN Zhengyang, JIANG Wei, LI Jing, FENG Jun, ZANG Hongliang, LIU Qiang, NIU Chenyang, TAO Longchun, ZHANG Yun, SUN Xiaohui, WANG Xiang, LIU Yang, LI Qite, LOU Jianling, LI Xiangqing, HUA Hui, JIANG Dongxing, YE Yanlin

(State key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics,  
Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** In this paper Pulse Shape Discrimination(PSD) for silicon detector has been briefly introduced. The emerging digital method successfully applied to detector signal processing makes digital PSD method one of the most promising particle identification methods. Sampling frequency and the number of bits are two key parameters of digital method. For silicon detector signal, adopting 100 Ms/s, 12 bit Digitizer can satisfy the time resolution requirement of PSD method. The identification characteristic and energy threshold of this method have been discussed and compared with both front injection and rear injection cases. Energy threshold with rear injection usually is much lower than that with front injection. For example, around for Neon isotope energy threshold with rear injection is about 100 MeV which is only half of the threshold with front injection, also equivalent to thickness of about 60  $\mu\text{m}$  silicon detector threshold in  $\Delta E$ - $E$  method. At the end the impact of silicon detector's resistivity nonuniformity and channel effect on the identification capacity of PSD method has been discussed in detail.

**Key words:** silicon detector; digital pulse shape discrimination; rise time; digital method; energy threshold; resistivity nonuniformity; channel effect

Received date: 29 May 2016; Revised date: 7 Jun. 2016

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11375017)

<sup>†</sup> Corresponding author: LI Zhihuan, E-mail: zhli@pku.edu.cn.