

超薄型外延硅 dE/dX 探测器及其在核实验中的应用

王柱生 晁致远 许金兰

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 本文介绍了厚度为 5.2、6、7 和 $10\mu\text{m}$, 有效面积为 $28\sim 154\text{mm}^2$ 的超薄型外延硅 dE/dX 探测器(对于 $8.78\text{MeV}\alpha$ 粒子的能损 ΔE 的分辨为 $48\sim 76\text{keV}$)及其研制工艺、主要用途、测试结果及在核物理实验中的应用。

关键词 外延硅, 氧化, 能量分辨.

1 引言

为了满足从事重离子核物理研究工作的需要, 我们从 70 年代起已研制出了各种不同规格的金硅面垒 dE/dX 半导体探测器. 由于该探测器具有体积小、脉冲上升时间短、线性响应好和使用方便等优点, 故在核辐射探测中占有重要地位, 为核物理研究作出了一定的贡献.

在核物理实验中, 不同厚度的全耗尽透射式硅 dE/dX 探测器是必不可少的重要探测工具之一. 特别是在重离子引起的核反应中, 其反应产物比较复杂, 于是要求探测系统不仅能测量粒子的能量, 而且还能鉴别出各类粒子. 鉴别粒子的常用方法是由半导体探测器 $dE/dX-E$ 组成的望远镜系统. 当带电粒子穿过 dE/dX 探测器时, 可得到一个与入射粒子能量、质量和核电核有关系的信号, 系统的鉴别能力基本上取决于 dE/dX 探测器性能的优劣. 用常规硅单晶材料制作 dE/dX 探测器时, 存在研磨不太均匀的问题. 而 Si 片的减薄主要靠化学腐蚀来完成, 由于减薄过程中受腐蚀液的流向, 流速及散热等因素的影响, 使得最后硅薄片的均匀性受到了很大的限制, 其形状成为铁饼形, 中间厚边缘薄并容易破碎. 因而有成品率低, 有效面积小等缺陷, 从而影响了能量分辨和探测效率. 为此, 我们研制出了外延硅 dE/dX 探测器. 它具有多重散射小, 空间分辨率高、响应时间快、耐

辐射、可改进粒子与重离子的鉴别、可提高能量和快定时测量中的信噪比等优点. 该探测器主要用来测量低能带电粒子(p 或 α)并作粒子鉴别的测量.

2 探测器的制造工艺

2.1 材料有关参数

所用的材料是 N 型外延硅片, 其参数为

衬底电阻率 $\rho=0.03\Omega\cdot\text{cm}$

外延层电阻率 $\rho=23\sim 30\Omega\cdot\text{cm}$

衬底厚度 $350\mu\text{m}$

外延层厚度 $6\sim 10\mu\text{m}$

2.2 工艺流程

外延硅 dE/dX 探测器与普通材料制成的 dE/dX 探测器相比较工艺复杂繁琐, 主要表现在外延面的保护和衬底的腐蚀等方面. 我们的制作方法是: (1) 把外延面用石蜡或真空密封胶(三氯乙烯溶化), 使其得以严格保护, 切勿使外延面露出, 并进行研磨 (M_{20} 、 M_{14} 、 M_{10} 、 M_7) 或者强腐蚀(腐蚀液的配方为 HNO_3 : HF : $\text{CH}_3\text{COOH}=5:1:1$ 或 $3:1:1$) 到 $200\mu\text{m}$ 左右, 要求表面无划痕; (2) 用三氯乙烯除掉石蜡和真空密封胶数次, 并在超声波的作用下用三氯乙烯、丙酮、无水乙醇和去离子水进行超洗, 每次超洗时间约 10min, 在烘箱内或红外灯下烘干(无水珠即可); (3) 把洁净的外延硅片固定在用石蜡保护的玻璃板上, 外延面紧贴玻璃板, 衬底朝上, 外延面的边缘

用真空密封胶保护(约 2mm 宽),主要是便于电镀洗以防破裂;(4)用 I 号腐蚀液进行腐蚀,时间约 3h,腐蚀速率大约 1.2 $\mu\text{m}/\text{min}$,在灯光下看到边缘透红时停止腐蚀,用去离子水淬灭洗掉酸液和用干净的过滤纸吸附硅片表面的水珠,在透红的边缘涂上一圈真空密封胶,再用 II 号腐蚀液进行第二次腐蚀,速率小于 1 $\mu\text{m}/\text{min}$;(5)把合格的外延硅片放在热三氯乙烯液中取下来,装在聚四氟乙烯网架上进行漂洗数遍,目的在于把石蜡和真空密封胶彻底清洗干净;用丙酮漂洗除去三氯乙烯,为确保表面干净,用氢氟酸剥去片子表面的氧化层,时间约 2min,用热高纯去离子水氧化冲洗数遍(严防硅片暴露)后,最后在烘箱内烘干待封装。

3 探测器的性能测试

外延硅 dE/dX 探测器和普通材料制成的探测器性能和质量优劣主要用伏安特性、能量分辨及耗尽层厚度等来衡量。伏安特性就是反向漏电流与探测器工作电压之间的关系,反向漏电流主要有三种来源。

1)饱和电流(I_s),由少数载子所引起。

2)产生电流(I_g),主要与复合中心的存在有关,而复合中心是由杂质原子或结构的不完整引起的,并和它们在禁带内的能级有关。

3)表面漏电流通常要比饱和电流与产生电流之和要大,主要取决于硅片表面的一系列技术处理。表面电特性是决定器件漏电流的主要因素,被污染的硅片表面的行为,如同轻掺杂 N 或 P 型沟道;表面沟道引起的效率损失,如表面条件随时间而变,将发生效率漂移,表面沟道构成——未知和可变的死层,所认表面处理和周围环境的洁净是非常重要的。外延硅 dE/dX 探测器能量分辨,除了与引起普通金硅面垒探测器能量展宽的因素有关外,还与沟道效应、朗道效应和厚度的不均匀性有关。外延硅材料的厚度均匀性比较好,但对衬底腐蚀要严格以保证外延层的均匀性

不受影响,使不均匀性减到最小值,否则会影响外延硅 dE/dX 探测器的能量分辨。除以上三种漏电流之外,还有一种是结周围产生的表面漏电流,或称结电流。这种结电流对探测器的分辨有较大的影响,同时还产生一个高电平的低频噪声。但是,用适当的表面钝化和使用保护环结构的探测器,便可大大降低此噪声。目前还没有解释这种噪声行为的合适理论。我们采用环氧树脂封装胶作为探测器的保护环,其效果十分显著。不论从质量、成品率都大大提高,如图 1 和表 1 所示。

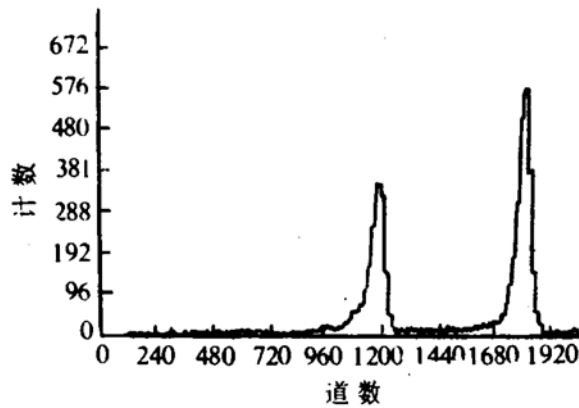


图 1 为 Th²³²c 源 α 粒子穿透 5.2 μm 厚的超薄外延硅 dE/dX 探测器后沉积在 160 μm E 探测器的能谱

表 1 超薄型外延硅 dE/dX 探测器的有关性能指标

有效面积 (mm^2)	能量分辨 (keV)	厚度 (μm)
28~80	56~70	5.2
28~154	56~70	6
28~154	58~76	7
80~154	48~72	10

4 核物理实验中的应用

实验是在高能物理所加速器上完成的。用我们研制的 7、10、30 和 160 μm 厚的金硅面垒 dE/dX 薄片及 E 探测器测量了 $\text{P} + {}^{20}\text{Ne} \rightarrow {}^{20}\text{Na} + \text{n}$ 反应中产生的奇异核 ${}^{20}\text{Na}$ 的带电粒子谱,发现了 ${}^{20}\text{Na}$ 的 β 延迟低能 α 衰变(E。

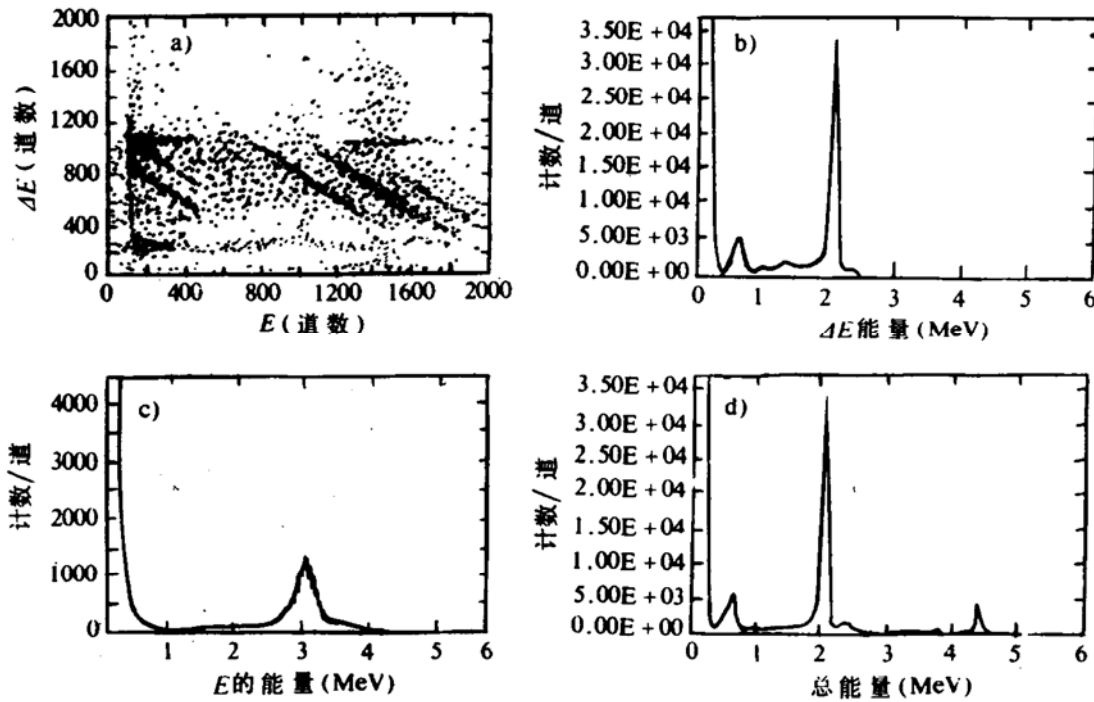


图2 $7\mu\text{m}$ 厚超薄型外延硅 dE/dX 探测器和 E 探测器组成的望远镜测到的 ΔE 、 E 和 E_{total} 谱及其所对应的双维谱

$\approx 0.78\text{MeV}$, 如图2所示. 这一发现对于 ^{20}Na 衰变性质的深入有重要意义.

首先用 $26\mu\text{m}$ 探测器测量了带电粒子单谱, 由于探测器薄(在此之前、国外用 $100\mu\text{m}$ 以上的探测器) β^+ 电子叠加本底很低和噪声小, 使 0.78MeV 低能 α 峰得以突出出来. 然后再用 $10\mu\text{m}$ 探测器作 dE/dX 探测器配合 $160\mu\text{m}$ E 探测器测量了 $\Delta E \sim E$ 双维谱, 谱中

几组 α 能量清楚可见, 低能 0.78MeV 的粒子只在 ΔE 上沉积能量而到不了 E 探测器, 由此可鉴别此粒子是 α 粒子.

参 考 文 献

- 1 IEEE NS-24 NO-1, 1977, 93
- 2 Nucl. Instrum. and Methods, 1977, 144(2): 353

Development of Superthin Epitaxial Silicon Detectors

Wang Zhusheng Chao Zhiyuan Xu Jinlan

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

Abstract The epitaxial Si- dE/dX surface barrier detectors with an active area of $28 \sim 154\text{mm}^2$ and thickness of $5.2 \sim 10\mu\text{m}$ have been developed. This kind of detector can be used for measuring α -particle, proton with low energy and for distinguishing particles, 0.78MeV ^{20}Na β -delayed low energy α -decay.

Key Words epitaxial silicon, oxidize, energy resolution.