

硅微条探测器

毛裕芳

一、引言

近年来,在高能物理实验上发展了一种新型探测器——硅微条探测器.这种探测器的特点是具有很高的空间分辨能力和很好的时间特性.从表1列出的目前在高能物理实验上几种常用的探测器性能的比较可以看出,硅微条探测器是位置分辨较好的一种.它的固有分辨近似为 $1\mu\text{m}$,目前在实际测量中所得到的最好的结果为 $4.5\mu\text{m}$.这个结果比当前使用的多丝室和漂移室的空间分辨能力要高1—2个数量级.

此外,硅微条探测器还具有其他一些特点,它能得住超过 $10^8\text{s}^{-1}\text{cm}^{-2}$ 的高计数率;能在 $10^{14}\text{--}10^{18}\text{m}^{-2}$ 的总电荷粒子流情况下有效的工作;由于体积小,它还可以根据物理实验的需要放在实验区内对撞点附近工作,甚至可以在贮存环内真空条件下工作等等.目前它已应用于作为顶点探测器来测量短寿命粒子,并成功的在实验上测量了短寿命的 ρ 粒子和底粒子以及 D^0 、 D^\pm 介子的多重衰变等.

表1 几种常用的高能探测器的主要特性

探测器的类型	定位精度 (rms)	分辨时间	死时间
气泡室	$\pm 10\sim 150\mu\text{m}$	1ms	$\sim 1/20\text{ s}$
流光室	$\pm 300\mu\text{m}$	$\sim 2\mu\text{s}$	$\sim 100\text{ms}$
多丝室	$\geq 300\mu\text{m}$	$\sim 50\mu\text{s}$	$\sim 200\text{ ns}$
漂移室	$\pm 50\sim 300\mu\text{m}$	$\sim 2\text{ns}$	$\sim 100\text{ ns}$
硅微条探测器	$\pm 5\mu\text{m}$	a.	a.

a. 受噪声和附加电子学读出时间的限制.

近年来,在许多国家中已相继开展了硅微条探测器的工作.如美国、英国、联邦德国、意大利等.他们多采用电容电荷分配法并取得了满意的结果.最近,美国 Brookhaven 实验室采用了一种新的电荷运输方案,在微条探测器的基础上发展成硅漂移室.它可使读出电子学大大地减少,并使空间分辨能力提高,是一种很有前途的探测器.

硅微条探测器已能制成 $(53\times 53)\text{mm}^2$ 的大小,并且还在不断增大,目前正在试制 $(72\times 72)\text{mm}^2$ 的探测器.

二、工作原理

图1是硅微条探测器的截面示意图.它由一块厚度为 $280\mu\text{m}\text{--}400\mu\text{m}$ 的n型高阻硅材料制成.硅片

的一边为连续的 n^+n 结,另一边为条形的 p^+n 结.在硅片上加上适当的反向偏压使整个探测器厚度内全耗尽,并提供收集电场.当快速带电粒子穿过探测器时在耗尽区内产生电子-空穴对,它们在收集电场作用下向相反的电极移动,因而感应出信号并被外电路测量.

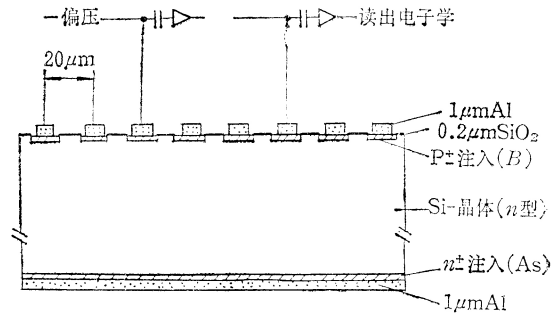


图1 一个完整探测器的横截面图

目前硅微条探测器多数采用电容电荷分配法读出.图2是微条的设计示意图.其特点是使读出电子学道数减少几倍(相对于每条读出而言),其所收集的电荷大小依赖于条间的电容分配到邻近的输出条上,它需要与低噪音的电荷灵敏前置放大器相匹配.

为了使电容电荷分配法有效地工作,必须考虑以下几个问题:

①均匀收集电荷:为了使电荷收集均匀,中间各条必须与读出条保持在同一电位点上,以避免改变探测器的内电场.

②消除干扰:为了避免条间相互干扰,读出条的阻抗必须大大于电子学的输入阻抗.

③避免信号损失:为了得到最佳的空间分辨和脉冲高度响应的稳定,读出条间电容必须大于条与地之间的电容.为了做到这点,一种可行的办法是在相邻条间制作一个附加电容.

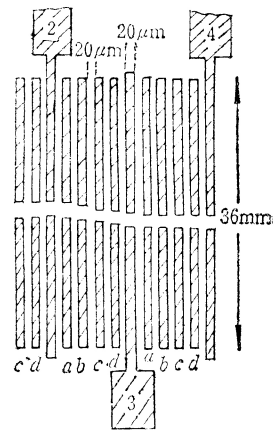


图2 探测器微条的设计示意图

三、制备方法

硅微条探测器所用的材料是高阻掺磷无位错的n型单晶硅,定向 $\langle 111 \rangle$,电阻率为 $3\text{k}\sim 10\text{ k}\Omega\text{cm}$,表2列出了硅晶体的特性.

硅微条探测器的制备是按照 J. Kemmer 所描述

的技术制备的。这种工艺包括氧化钝化、离子注入、光刻腐蚀等。氧化钝化表面可有效地减少表面漏电流。离子注入在适当选择参数时，可得到薄的死层和不对称的突变结。利用光刻技术不仅可得到精细的几何结构，很小的几何公差，而且还可以随意改变其形状使制成微条探测器成为可能。

表2 硅晶体特性

无位错单晶	<111>定向
区域提纯、掺磷、电阻率	>3kΩcm
电荷寿命	>1 ms
一边抛光/一边无损伤腐蚀	
尺寸	2英寸±0.4mm/300±20μm

制备过程的主要步骤如下：

- 在 1040℃ 热氧化得到 0.2 μm 的 SiO₂ 层。
- 光刻开条。
- p⁺ 条注入是用每平方米 5×10¹⁴ 硼离子在 15keV 时轰击。
- n⁺ 接触注入是用 5×10¹³cm² 磷离子在 30keV 时轰击。
- 晶体在 600℃ 进行热熟化。
- 在晶体的两面蒸~1 μm 铝层。
- 条式样光刻腐蚀。

表3 一种硅微条探测器的典型特性

材料	3kΩcmn-Si 单晶
大小	φ2英寸,厚 300μm
辐射长度	3×10 ³
耗尽电压	120 V
最小电离粒子产生电子空穴对数目	24000
条间隔	20 μm
条长	36 mm
灵敏面积	24×36mm ²
读出条数目	240
读出条间隔	60μm、120μm
空间精确度	4.5 μm、7.9 μm
二粒子分辨	60μm、120μm

为了避免沟道效应，在离子注入过程中需将材料放在在与<111>定向成7度角的位置上。表3给出了一种硅微条探测器的特性。

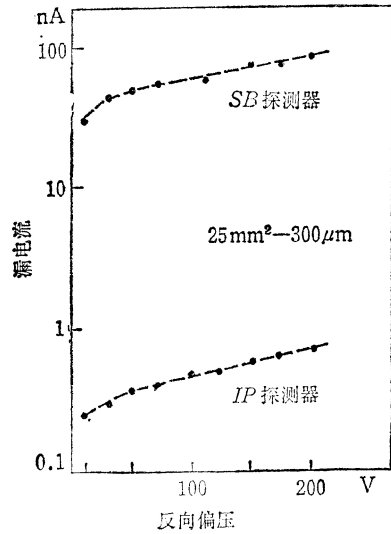


图3 探测器用离子注入法和面垒法得到的漏电流与反向偏压的关系

四、电流—电压特性

图3给出了探测器用离子注入法和用面垒法得到的其漏电流和反向偏压的关系图。从图中可以看出，用离子注入法得到的漏电流至少比面垒法所得到的最好值要小一个数量级。

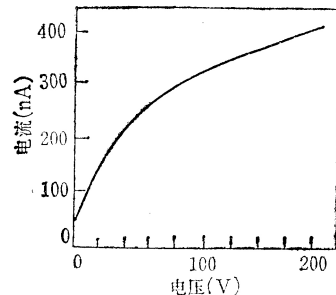


图4 硅微条探测器的电流—电压特性

对于具有高空间分辨的探测器来说，在外加反向偏压下探测器的灵敏区全耗尽时，要求探测器的每个读出条上的暗电流为 1 nA 左右，这个

值低于电子学噪声电流 100 倍左右。

对于一个完整的硅微条探测器的电流—电压特性表示在图4中。

五、电荷收集

对一个最小电离粒子来说，它在厚度为 100μm 的硅内最大可能的能量损失为 29keV，产生约 8000 个电

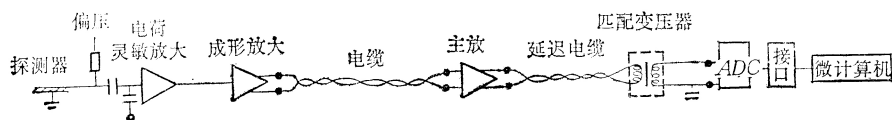


图5 电子学读出系统方块图

子-空穴对,或者约 1.3×10^{-15} 库仑的电荷量.所以对于约 $400\mu\text{m}$ 厚的硅探测器来说,其产生的最大电荷量为 5.2×10^{-15} 库仑,或约 32000 个电子空穴对.这些电荷载流子在探测器内电场作用下向相应的电极漂移.在硅中, 电子的漂移迁移率为 $1450\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 空穴的漂移迁移率为 $450\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$.通常,当探测器所用的硅材料厚度为 $300\mu\text{m}$, 电阻率为 $3\text{k}\Omega\text{cm}$,工作偏压为 120V 时,其典型的电荷收集时间小于 10ns .

六、电子学系统和读出方法

图 5 表示了电子学读出系统的方块图.它包括电荷灵敏前置放大器,成形放大器、主放大器、ADC 模数变换器以及微计算机等.

读出条上的信号是经过电荷灵敏前置放大器、成形线路、快上升时间的输出信号系统、电压灵敏的 ADC 编码,然后在微计算机上被记录下来.根据读出条信号分布的重心来确定粒子的位置.典型的等效 rms 噪声相当于在输入端 750 电子,近似为最小电离粒子所产生的电荷的 3%.除了粒子穿过时产生的信号和电子学噪声比 r 外,对条型探测器来说,条式样的几何形状、条间隔 d 、电荷分布宽度 ω 以及总条数与读出条之比 n 等对探测器的空间分辨率也有一定的影响.

在一般情况下,电子学的典型 r 值约为 $0.025-0.060$ 当条间隔 d 大于电荷分布宽度 ω ,且 $r < 1/2n$ 时,其空间分辨率约为 $d/\sqrt{12}$;当条间隔 d 与电荷分布宽度相当时,其空间分辨率约为 $n \cdot d \cdot r$.

七、辐射损伤

根据 H. W. Kraner 的研究,硅探测器的辐照情况可以用损伤常数 K 来描述,损伤常数 K 可由下式确定

$$1/\tau = 1/\tau_0 + K\phi$$

τ 是少数载流子寿命.当少数载流子寿命比辐照前载流子寿命减少很多时,这个式子可简化为 $\tau = 1/K\phi$.可以看出, K 值是与射线通量 ϕ 和 τ 有关.在硅中对于 1MeV 的快中子来说,其 $K = 1 \times 10^{-5}\text{cm}^2/\text{s}$,而对于最小电离粒子来说,其 $K = 4 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$.

在硅中,实际所能承受的粒子数,对快中子为 $3 \times 10^{10}\text{cm}^{-2}$,而对最小电离粒子为 $7 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$.这个值表明在实验中中子比起其他粒子能引起更大的损伤.这是因为对于高纯硅来说,高能粒子引起的主要缺陷是双空位,而中子在硅中则引起大量的缺陷聚体.当 10^{11} 热中子 $/\text{cm}^2$ 照射后,可使探测器的漏电流增加,噪声增大,信号变坏,这就严重地影响到探测器的正常工作.而对高能粒子来说,硅条探测器在 $\sim 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 粒子轰击下,没有观察到性能变坏的迹象.实验表明,在 $10^{13}-10^{14}\text{cm}^{-2}$ 强子流下,探测器仍能有效的工作.

此外,对高纯硅材料来说,探测器越薄其射照寿命也越长.

八、应用

具有高空间分辨能力的硅微条探测器约在八十年代初问世以来给予了广泛的研究.目前在高能粒子物理上已应用于以下几方面:

- ① 作为高精度的顶点探测器或顶点再现探测器.
- ② 用于研究介子 D^0 、 D^\pm 介子的多重衰变.
- ③ 测量短寿命 ($3 \times 10^{-14} - 5 \times 10^{-12}\text{s}$) 的重夸克粲粒子和底粒子.
- ④ 用于高强度的次级束流中作为束流形状监测器和快束流描述仪.
- ⑤ 作为高速率的特殊触发器.

现将国外已使用和准备使用硅微条探测器的高能物理实验列入表 4 中

表 4 硅微条探测器用于高能物理实验的实例

实验名称	物理目标
NA-11 (CERN)	研究强子反应中的粲粒子及 $175\text{GeV}/c\pi^-\text{Be}$ 反应中的 D 介子
NA-14(CERN)	利用高能光子研究短寿命的粲粒子的产生和衰变
E-687(NFAL)	研究重夸克底粒子
LEP-DELPHI 组	研究和改进作为顶点探测器的设计方案
ACCMOR 合作组	研究高能强子碰撞产生的粲粒子和 D^+ 的衰变
NA-32 (CERN)	研究强子反应中的粲粒子及 D, F, Ac^- 的寿命
FMP3 (FNAL)	研究短寿命粲粒子和底粒子的产生和衰变
E-653 (FNAL)	研究粲粒子和底粒子的产生和衰变

总之,硅微条探测器是一个很有前途的探测器.它除了有很高的空间分辨率和很好的时间特性外,它还能很好的分辨双径迹和呈受高计数率的特性.这后一特性在有些应用中往往比前者更有价值.