

硅微条探测器的研制

毛裕芳

(中国科学院高能物理研究院, 北京 100039)

郭昭乔 张秀凤

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要

本文介绍了利用“平面工艺”新技术研制成功的硅微条探测器。该探测器所用的硅材料为n型硅,电阻率为 $3\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$,晶向 $\langle 111 \rangle$ 。探测器的厚度为 $400\mu\text{m}$,灵敏面积为 $18\text{mm}\times 12\text{mm}$,条宽为 $20\mu\text{m}$ 条间隔为 $20\mu\text{m}$,共有300个微条。在反向偏压为100V时,其漏电流为 $5\times 10^{-9}\text{A}$ 。用电荷收集分布方法测得该探测器的位置分辨为 $5.3\mu\text{m}$ 。

一、引言

硅微条探测器是近年来发展起来的一种新型探测器。由于它具有很高的空间分辨能力和很好的时间特性,现已广泛地应用于高能物理实验中。表1列出了当前在高能物理实验中几种常用的探测器性能的比较。目前硅微条探测器在测量中所得到的最好位置精度为 $2.7\mu\text{m}$ ^[1]。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。

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	$\pm 10-150\mu\text{m}$	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	$\pm 50-300\mu\text{m}$	$\sim 2\text{ns}$	$\sim 100\text{ns}$
硅微条探测器	$\pm 3\mu\text{m}$	a.	a.

a. 受噪声和附加电子学读出时间的限制

硅微条探测器还具有其他特有的性质,它能承受很高的计数率并有强的抗辐照能力^[2],且它的体积小,因而可根据高能物理实验的需要,放在实验区对撞点附近工作。目前,它主要用作顶点探测器^[3,4]。在高精度地确定粒子径迹以及短寿命粒子的研究等方面已取得很好的结果。

八十年代初,西德慕尼黑技术大学J. Kemmer教授^[5,6]利用了制备半导体MOS器件

的工艺成就,创造性地解决了一些技术难题,使平面工艺成为硅探测器制备的一种新方法,并使硅探测器的性能提高到一个新的水平.这种平面工艺的特点是综合了氧化钝化、离子注入、光刻腐蚀等技术.目前,用平面工艺制成的硅探测器得到了迅速的发展.现已发展的类型还有:二维成象硅微条探测器^[7];硅漂移型探测器^[8,9]以及硅单元成象型探测器^[10]等.随着高能物理发展的需要,还将着手研究三维硅探测器的结构^[1].

我国在这方面的研究工作起步较晚.为了掌握高新技术,我们已对平面工艺进行了研究.现已制成了我国自己的硅微条探测器.并掌握了制备高精度硅微条探测器的平面工艺条件.

二、硅微条探测器的研制

1. 工作原理

图 1 是一个典型的硅微条探测器的示意图.它是在一个很薄的 n 型硅片上做成一面为 n⁺n 结,一面为 p⁺n 结的条状.在适当的反向偏压下使探测器耗尽,并提供一个收集场.当快带电粒子穿过探测器时,在探测器内产生电子-空穴对.这些电荷载流子在电场作用下向相应的电极漂移,因而产生电信号,并在外电路中被测量出.

半导体硅材料有良好的特性.它有很小的间隙能(1.1eV),它产生一个电子-空穴对所需要的平均能量是 3.6eV.这比气体探测器需要 30eV 要小许多,因而导致了它有较大的初始电离.

对于最小电离粒子来说,硅微条探测器每单位长度的能损 $dE/dx = 3.8\text{MeV/cm}$.在厚度为 $100\mu\text{m}$ 的硅内,其最大可能的能量损失为 29keV,产生约 8000 个电子-空穴对,或约 $1.3 \times 10^{-15}\text{C}$ 的电量.所以对于厚度为 $300\mu\text{m}$ 的硅探测器来说,可产生的电荷量为 $4 \times 10^{-15}\text{C}$ 或约 24000 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,很容易被直接测量.由于不存在气体探测器中的倍增问题,使它的 δ 电子少且射程短(几个 μm),因而位置测量相当精确.

另外,由于硅微条探测器很薄,且电子和空穴的漂移速度较快(室温下,电子的迁移率为 $1380\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$,空穴的迁移率为 $480\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$),这使得在 10ns 内快电荷的收集成为可能,因而也适合作为快时间测量.

2. 材料和结构

众所周知,探测器性能的好坏取决于器件本身的性能和制备条件的控制.我们所用的硅材料是有色金属研究院生产的高阻 n 型硅.其电阻率为 $3000\text{--}5000\Omega \cdot \text{cm}$,晶向 $\langle 111 \rangle$,电荷载流子寿命大于 1ms.

在结构上,选择了条宽为 $20\mu\text{m}$,条间距为 $20\mu\text{m}$,条长为 18mm,共 300 条,有效面积为 $18\text{mm} \times 12\text{mm}$ 的硅微条探测器.其大小是受到当时探测器级的硅材料的水平所限.

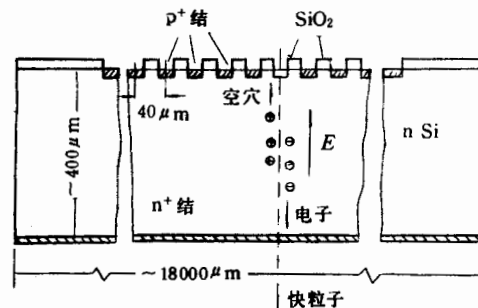


图 1 一个典型的硅微条探测器示意图

3. 制备方法

用平面工艺制备硅微条探测器的主要工艺过程:

①研磨清洗:为了得到高性能的硅微条探测器,清洗方法极为重要,因为它贯穿在整个工艺过程中的每一步.为此,建立了一套既简便又适用的清洗方法.整个制备过程必须在超净室内进行,并使用电子级纯的化学试剂.

②氧化钝化:由于 SiO_2 的质量直接影响到探测器的参数.氧化可完全消除表面漏电流,所以控制氧化条件很重要.氧化方法是采用氧气(干)加氯化氢的方法,温度为 1030°C , SiO_2 层的厚度为 $0.3\text{--}0.7\mu\text{m}$.

③光刻开条:研究了光刻版的设计和光刻工艺流程.光刻工艺包括涂胶、前烘、曝光、显影、坚膜、腐蚀和去胶等.

④离子注入: p^+ 条注入硼离子,其注入能量为 30keV ,剂量为 $5\times 10^{-14}/\text{cm}^2$. n^+ 接触面注入磷离子,其注入能量为 30keV ,剂量为 $5\times 10^{-15}/\text{cm}^2$.为了避免沟道效应,注入方向应与硅片 $\langle 111 \rangle$ 定向成 7° 角为好.

⑤退火熟化:注入后的硅片在干燥的氮气中 600°C 时退火 30 分钟.不同的退火方法对器件性能也产生影响.退火不仅是个热熟化过程,而且可使注入时造成的晶格损伤得以恢复.

⑥铝金属化:由于探测器是属于浅结器件,因此必须注意合金的温度和时间.在温度为 430°C 时,合金 3—5 分钟,铝层的厚度为 $1\mu\text{m}$.

⑦反光刻:对条面进行反光刻以除去氧化层上的铝层.此外还研究了结的终端扩展技术,采用结边缘保护和场板极相结合的方法.这有效地提高了探测器的击穿电压和成品率.

⑧封装,焊引线:为了将探测器的信号从读出条引出,探测器是固定在一个已制好版的与探测器成同一水平面的印刷线路版上.其铜线扇出是从 $200\mu\text{m}$ 到 1.5mm .利用 $25\mu\text{m}$ 的硅铝丝将探测器输出端与扇出版线超声焊接.为了便于测量,整个装置是放在一个电屏蔽的紫铜盒内.

通过对平面工艺条件的研究,我们已掌握了硅微条探测器的制备工艺技术.已制好的器件的伏安特性测试结果如图 2 所示.在反向偏压 100V 时,其漏电流为 $5\times 10^{-9}\text{A}$.

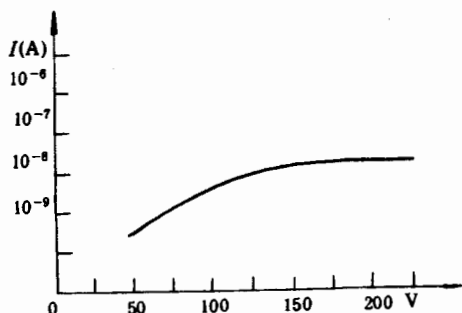


图 2 伏安特性

三、探测器的位置分辨

通常测量探测器的位置分辨是采用三室法,由高能粒子依次穿过三个硅微条探测器来确定的.由于受条件所限,我们采用了 E. Belau 等^[11]提出的方法.即使用放射源和单个探测器,通过对电荷收集分布的测量来确定其位置分辨.

1. 电荷收集分布的实验测量

图 3 表示了电子学系统和读出方式.

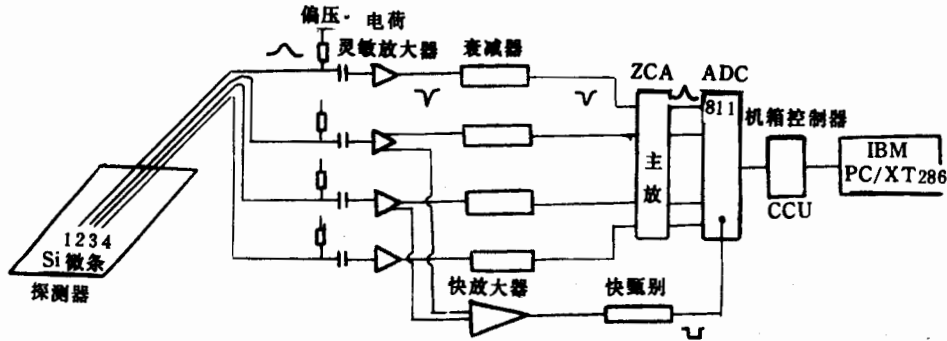


图 3 电子学读出系统方块图

测量中取四路读出条引出,每个读出条的信号经过电荷灵敏前置放大器,分别接 0—31db 衰减器,再进入 ZCA-CAMAC 主放大器插件.主放大器的输出端接 AD811-CAMAC ADC 插件,然后经 CCU CAMAC 机箱控制器与 IBM-PC/XT-286 微机相联.再将 2,3 路的输出信号,经快放大和快甄别器成形后作为 AD811-ADC 的选通脉冲.

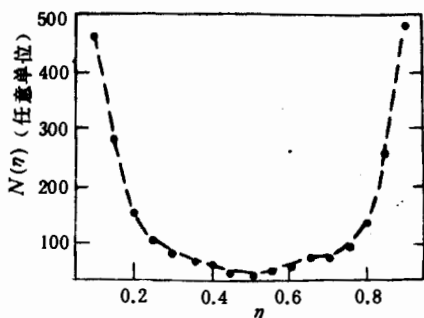
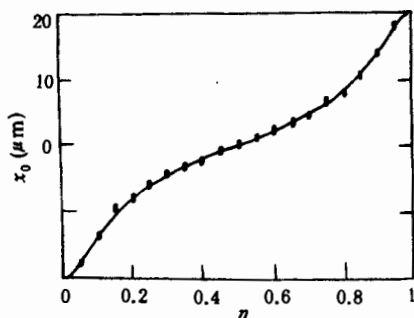
测量时,探测器加反向偏压 100V,测试源是直径为 8mm,强度为 $13\mu\text{Ci}$ 的 $^{241}\text{Am}\alpha$ 源 ($E=5.5\text{MeV}$).源放置在距探测器约 1cm 处.

探测器的输出为正脉冲,经电荷灵敏前置放大器放大后,输出负脉冲.脉冲的上升时间为 $0.2\mu\text{s}$,衰减时间为 $2\mu\text{s}$,宽度为 $0.75\mu\text{s}$.其典型幅度为 3mV .AD811-CAMAC ADC 插件要求 2V 的正脉冲,而 ZCA 主放大器的放大倍数较大,需要加衰减器使放大器的输出脉冲不超过 2V.而 ADC 插件还要求负 NIM 电平的选通脉冲,这由 2,3 两路前放输出经快放大器和快甄别器来提供.

测量时,首先观察四路 ADC 记录的道数,发现同时只有两路或一路 ADC 有记录.选 ADC (2)(左脉冲幅度)和 ADC (3)(右脉冲幅度)都不为零的事件,左、右脉冲幅度分别为 $PH(L)$ 和 $PH(R)$.取 $\eta=PH(R)/[PH(R)+PH(L)]$,记录粒子的 η 分布 $N(\eta)$,得到 $N(\eta)$ 与 η 的关系.如图 4 所示.

通过公式 $x_0=\Delta/N_0\int_0^{\eta}(dN/d\eta)d\eta-X_0$.可计算出一个 η 值的平均碰撞点位置 x_0 .其中 N_0 是 2,3 电极间记录的粒子总数, Δ 是 2,3 条之间的宽度.在我们的情况下 $\Delta=40\mu\text{m}$, $X_0=\Delta/2$,得到的 x_0 与 η 值的关系曲线表示在图 5.

电荷收集分布函数 $f(x)=d\eta/dx$,可以从 η 分布函数 $N(\eta)$ 得到 $dN/d\eta=(dN/dx_0)\cdot(dx_0/d\eta)=N_0/\Delta\cdot(1/f(x))$,所以 $f(x)=\Delta/N_0(1/dN/d\eta)$.由此得到粒子到达读出条

图4 $N(\eta)$ 与 η 的关系图5 x_0 与 η 值的关系曲线

时,碰撞点周围的电荷载体的分布图,如图6所示.从图中可以看出,其半高的全宽度为 $10.5\mu\text{m}$.

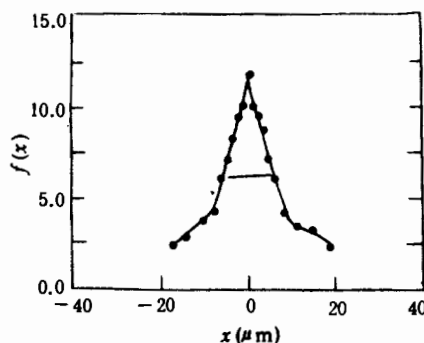


图6 电荷收集的分布图

从实验中测出的 $N(\eta)$ 和由此而得到的 $x(\eta)$, $f(x)$ 与我们用 Monte Carlo 理论计算的结果^[12] 比较,其总的特点和趋势是一致的.但实验得到的 $N(\eta)$,在 $\eta=0,1$ 附近的变化比理论计算的要慢些.相应的 $x(\eta)$ 在 $\eta=0,1$ 附近上升也缓慢一些.实验得到的电荷收集分布宽度也比理论值宽.这是由于探测器电子学的噪声以及入射粒子方向的角分散等原因引起的.

2. 探测器位置分辨的获得

从已得到的电荷收集分布,利用 Monte Carlo 方法可得到探测器的位置分辨.如前所述,探测器的位置分辨与粒子进入的位置有关,所以这里所指的探测器的位置分辨是取对不同位置的平均值.

在 Monte Carlo 计算中,假定粒子是均匀并垂直入射到探测器上,其中有两个可调参数:一是电荷收集分布的宽度;一是信号噪声比.

给定一个位置 x ,则有一定的几率在电极2上得到电荷 $PH(L)$,而在电极3上得到的电荷为 $PH(R)=1-PH(L)$.由于2,3电极上得到的电荷受噪声的干扰,因而得到的是一个新的 η' 值.从 η' 值又可找到一个位置 x' , $\Delta x = |x' - x|$.对大量粒子取平均值,即可得到探测器的位置分辨.

结果表明探测器的位置分辨更依赖于信噪比.利用示波器观察前置放大器输出的噪声水平为 0.5mV (峰-峰值),相当探测器的噪声电荷为 $6 \times 10^{-16}\text{C}$ 或 4000 个电子.而最小电离粒子在探测器上产生的信号为 24000 个电子,故噪声和信号比约为 0.2.电荷收集分布的实验值 $\text{FWHM} = 10.5\mu\text{m}$.由此得到的空间分辨约为 $5.3\mu\text{m}$.而电荷收集分布的理论计算值 $\text{FWHM} = 7.5\mu\text{m}$ ^[12],所得到的空间分辨值为 $4.4\mu\text{m}$.

四、结束语

硅微条探测器在我国是首次制成.它的研制成功标志着我国的平面工艺技术已达到

了一定的水平. 虽然还存在一些问题, 但它为进一步的发展提供了依据和手段.

在这项工作中, 我们得到了多方面的支持. 首先感谢北京半导体器件五厂的领导和同志为我们提供了很好的工作条件和帮助. 在电子学和测试方面得到了高能所许多同志的支援和帮助. 庄红林同志和郭子正同志参加了部分工作, 在此一并致谢.

参 考 文 献

- [1] J. Kemmer and G. Lutz, *Nucl. Instr. and Meth.* **A273**(1988), 588.
- [2] Mituhiro Nakamura, Yasuhiro Tomita and Kimio Niwa, *Nucl. Instr. and Meth.* **A270**(1988), 42.
- [3] B. Hyams and U. Koetz et al. , *Nucl. Instr. and Meth.* , **205**(1983), 99.
- [4] Lnis Labarga et al. , *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* , **NS-38**(1991), 25.
- [5] J. Kemmer, *Nucl. Instr. and Meth.* , **169**(1980), 499.
- [6] J. Kemmer, P. Burger, P. Henck and E. Heijne, *IEEE Trans on Nucl. Sci.* , **NS-29**(1982), 733.
- [7] B. S. Avset L. Evensen V. Chcbaud H. Dijkstra et al. , *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* , **NS-37**(1990), 1153.
- [8] G. Hall, *Nucl. Instr and Meth.* **A273**(1988), 559.
- [9] Emilio Gatti and Pavel Rehak, *Nucl. Instr. and Meth.* , **225**(1984), 608.
- [10] G. Lutz and A. S. Sohwarz, *ECFA Study Week*, CERN 89—10 Vol. 1, 272.
- [11] E. Belau R. Klanner, G. Lutz, E. Neugebauer et al. , *Nucl. Instr. and Meth.* , **214**(1983), 253.
- [12] 毛裕芳, 硅微条探测器的电荷收集, 第五届全国核电子学和核探测技术学术会议论文集, 1990. 8 兰州.

The Study of the Silicon Microstrip Detector

MAO YUFANG

(*Institute of High Energy physios, Beijing 100039*)

GUO ZHAOQIAO ZHANG XIUFENG

(*Institute of Atomic Energy, Beijing 102413*)

ABSTRACT

A silicon microstrip detector has been fabricated by the new method of planar process. A high-ohmic ($\sim 3\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$) n-doped silicon crystal, oriented in the $\langle 111 \rangle$ direction and $400 \mu\text{m}$ thick is used as base material. The sensitive area of the detector ($18\text{mm} \times 12\text{mm}$) is covered with p^+ implanted diode strips and Al contacts (300 strips, $20 \mu\text{m}$ width and $40 \mu\text{m}$ pitch). The leakage current is $5 \times 10^{-9} \text{A}$ at the reverse bias voltage of 100V. The distribution of charge collections of the silicon microstrip detector was measured and $5.3 \mu\text{m}$ of the spatial resolution was obtained.