

文章编号: 1007-4627(2011)03-0305-05

双面硅多条探测器的测试*

李占奎¹, 巩伟^{1,2}, 谭继廉¹, 魏计房^{1,2}, 王柱生¹, 韩励想¹,
田大字³, 于民³, 王金延³, 张录³

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100190;

3 北京大学微电子研究院, 北京 100871)

摘要:介绍了由中国科学院近代物理研究所和北京大学微电子研究院联合研制的双面硅多条探测器的初步测试过程及测试结果。测试内容包括:探测器的电特性、能量分辨率、二维能谱、条间串扰(crosstalk)。在-25 V 全耗尽偏压下,各条的反向漏电流均小于 10 nA,对于 5.486 MeV 的 α 粒子,正面各条的能力分辨率在 1.5% 左右,条间串扰在 6% 左右;背面各条能量分辨率稍差,在 3% 左右,其条间串扰在 1% 左右。同时对进口的 Micron BB1 直流耦合单边读出的双面硅条探测器做了相同测试,并进行了性能对比。

关键词:双面硅条探测器;电性能;能量分辨率;条间串扰

中图分类号: O571.1 **文献标识码:** A

1 引言

双面硅条探测器因具有较好的位置和能量分辨率、较宽的线性范围等优点,从而被广泛应用于高能物理、核物理、天体物理、宇宙线等实验研究^[1]。例如,由于其具有很好的二维位置分辨能力,世界各大高能物理实验室采用它作为带电粒子轨迹重建的顶点探测器^[2-5]。由于该探测器对低能和中能粒子的探测很有效,俄罗斯 Dubna 的 JINR 用其作为研究天体物理的望远镜^[6]。在低能区的超重核合成研究中,双面硅条探测器常被用作余核注入探测器,通过对余核级联衰变的粒子进行时间、位置的关联测量来指认目标核等^[7-8]。在高粒子多重性的中能重离子碰撞研究中,该探测器又可作为粒子鉴别的 $\Delta E/E$ 探测器。例如:在中国科学院近代物理研究所的 HIRFL-CSR 外靶终端,靶区周围准备使用前后两组 32 单元的双面硅微条探测器装备成 $\Delta E-E$ 阵列,负责粒子鉴别和径迹测量。

硅条探测器需采用微机械加工工艺和离子注入掺杂技术,制作工艺复杂,难度较大。目前,国内

实验用硅条探测器完全靠进口,且价格昂贵。所以中国科学院近代物理研究所与北京大学微电子研究院决定联合研制双面硅多条探测器。研制出的探测器所采用的硅材料为进口的经过双面抛光的 4 英寸标准优质高阻 N 型硅片。探测器的灵敏面积为 50 mm×50 mm, P 面和 N⁺ 面都为相互平行、宽度相等的 16 条,每一条 3 mm×50 mm,相邻条间栅间距为 100 μm 。主要工艺流程如下:(1)表面氧化,氧化层厚度为 6000 Å;(2)光刻探测器正面灵敏区窗口,注入硼离子(剂量为 2×10^{14} ions/cm²),退火形成 PN 结;(3)光刻探测器背面灵敏区窗口,注入磷离子(剂量为 1×10^{15} ions/cm²),退火形成欧姆接触;(4)光刻探测背面 N⁺ 条之间的栅隔离区,反刻出一道 20 μm 宽的沟槽,并在此进行硼注入(剂量为 2×10^{14} ions/cm²),形成 P-STOP 区;(5)P 面 Si 条溅射铝电极;(6)P 面氧化层区域反刻去掉铝层;(7)N⁺ 面 Si 条溅射铝电极;(8)N⁺ 面氧化层区域反刻去掉铝层。图 1 给出了结构示意图和实物照片。

* 收稿日期: 2010-12-29; 修改日期: 2011-01-18

* 基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KJCX3-SYW-No5)

作者简介: 李占奎(1968-), 男(汉族), 河南南阳人, 研究员, 博士生导师, 从事实验核物理研究;

E-mail: lizhankui@impcas.ac.cn

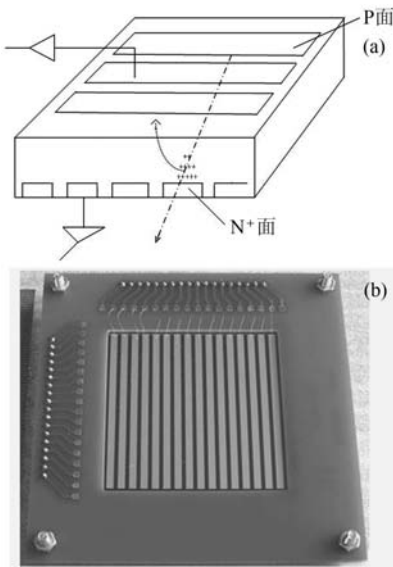


图 1 双面硅多条探测器的示意图(a)和实物照片(b)

2 测试原理及装置

2.1 电特性的测试

双面硅多条探测器的 $V-I$ 特性是使用 Hp4156B 半导体参数测试仪在屏蔽探针台中逐条测量而得到的。测量时, N^+ 条全部接地, P^+ 条接负电压。测试温度为 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 。根据所用硅片标称的电阻率得到该探测器的全耗尽电压为 20 V 左右。测试给出了偏压分别为 20 和 25 V 时每一条的漏电流, 能谱测量结果表明在这两种电压下探测器皆处于全耗尽状态。

2.2 探测特性的测试

测试中, 用三组份 ^{239}Pu 源和 ^{241}Am 源发射的 α 粒子对探测器进行了测试。测试在真空环境中进行 ($7.42 \times 10^{-4}\text{ Pa}$)。测试系统主要包括接收探测器输入信号的输入模块、对探测器信号进行放大成形和取样保持的专用集成电路芯片 (ASCI)、用于电路板功能测试的信号发生器、低压差分信号 (LVDS) 传输电路、电源系统、用于控制集成电路参数和读取环境参数的慢控制系统和其他辅助电路。读出电子学采用面向仪器系统的外设部件互连接口的扩展 (PXI) 总线的数据采集系统, 功能模块插件采用 PXI-6133 数字采集卡, 机箱采用 PXI-1033, 机箱控制器为 PCIe-8361。测试时, 硅多条探测器正反两面各 16 路信号全部引出。偏压电源通过模拟电路板将工作偏压加到硅多条探测器各

条, 由双面硅多条探测器输出的信号经过模拟电路板中的 ASIC 电路进入数字电路板中的复杂可编程逻辑器件 (CPLD), 再由计算机控制信号取样时钟驱动器进行数据获取, 并通过 LPT (并行接口) 将慢控制信号通过数字电路板馈入模拟电路板进行控制。

3 测试结果

3.1 漏电流和条间电阻

测试中, 将背面条 (N^+) 条全部接地, 正面各条加偏压。测量了偏压分别为 20 和 25 V 时各条的漏电流, 同时测量了背面相邻 N^+ 条的条间电阻。表 1 和表 2 分别给出了在 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 下 9# 探测器的电特性测量结果。

表 1 9# 探测器偏压为 20 V 和 25 V 时各条的漏电流

硅条序号	漏电流/ nA	
	偏压 20 V	偏压 25 V
1	3.55	4.00
2	3.31	3.71
3	4.04	4.60
4	3.15	3.55
5	3.34	3.77
6	3.31	3.74
7	3.75	4.33
8	3.25	3.68
9	3.24	3.71
10	3.24	3.71
11	3.27	3.69
12	3.27	3.65
13	3.28	3.73
14	3.29	3.66
15	3.31	3.66
16	3.42	3.90

随着温度的升高, 漏电流会有一定程度的增加。按照国际公认的标准, 平面工艺的漏电流在 $0.5\text{--}2\text{ nA}/100\text{ }\mu\text{m} \cdot \text{cm}^2$ 是优良的。表中列出的这个探测器的漏电流很小, 符合这一标准。表 2 给出了该探测器背面各相邻 N^+ 条之间的电阻 (0 偏压)。该指标对于双面硅条探测器而言非常重要, 因为它反映了 N^+ 条之间的隔离情况。在探测器处于全耗尽的情况下, 这个电阻值在几百 $\text{k}\Omega$ 范围。这些数据 and 进口探测器的指标相当。

表 2 9# 探测器背面相邻 N⁺ 条间的条间电阻

硅条序号	电阻/kΩ
1-2	3.5
2-3	3.5
3-4	3.6
4-5	3.6
5-6	3.6
6-7	3.6
7-8	3.6
8-9	3.7
9-10	3.8
10-11	3.8
11-12	3.8
12-13	3.8
13-14	3.7
14-15	3.6
15-16	3.4

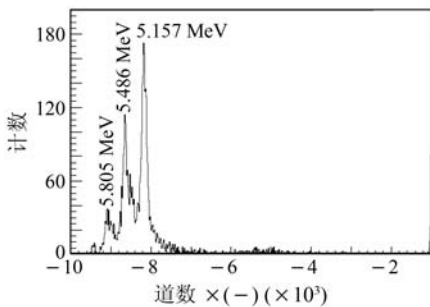
表 3 探测器正面各条能量分辨率

硅条序号	能量分辨率(%)
1	1.39
2	1.70
3	1.47
4	1.68
5	1.51
6	1.57
7	1.77
8	1.64
9	1.54
10	1.60
11	1.59
12	1.35
13	1.50
14	3.26
15	1.42
16	1.34

3.2 探测器特性

3.2.1 探测器的能量分辨率

测试中,用三组份²³⁹Pu源发射的α粒子对探测器进行了测试,²³⁹Pu源与探测器的垂直距离在3 cm左右。测量时将探测器背面接地,正面加负偏压。测试条件如下:工作偏压-24 V,主放成形时间 $t=1\ \mu\text{s}$,真空中测量($7.4\times 10^{-4}\ \text{Pa}$)。图2给出了探测器其中一条的能谱图。

图 2 双面硅多条探测器正面第 9 条²³⁹Pu α 源能谱

我们对该能量峰采用三峰高斯拟合,以确定峰位和统计误差。由 $FWHM=2.36\sigma$,进而根据 $\eta=FWHM/E$ 得到该探测器各条的能量分辨率。表3给出了正面各条的能量分辨率。背面各条的能量分辨率稍差,在3%左右,主要是因为背面镀铝死层厚度较大等原因而造成的。由此可以看出,我们制作的探测器各条均匀性方面还较差。

3.2.2 探测器的二维能谱和串扰(crosstalk)分析

在硅条探测器的制造中,相邻条之间会存在一个等效耦合电容。当某一带电粒子入射到一个条带并在其中产生一定电荷时,这一耦合电容会在相邻条中产生感应电荷,从而产生伪信号,即形成串扰(crosstalk)。目前主要有两种方法测量crosstalk:一种测试方法是在二维能谱中,相邻两条同时收集到的事件数占其中一条收集到事件数的百分比^[9]。另一种测试方法是在探测器的某一条上加入脉冲信号,相邻条上收集到的信号幅度和该条上收集到的信号幅度之比^[10]。

为方便起见,我们采用第一种方法测量crosstalk。图3给出了用²⁴¹Am源发射的α粒子测量的正面和背面相邻两条之间的二维能谱。²⁴¹Am源与探测器的垂直距离在3 cm左右。

²⁴¹Am放射源从正面入射时正面相邻两条的二维能谱图如图3(a)所示,平行于坐标轴的直线分别表示由条4和条5分别单独收集到的事件,两条直线间的第一象限区是一个向原点方向弯曲的曲线,表示由条4和条5共同收集到的事件。曲线上任一点对应的总能量(横坐标和纵坐标能量之和)小于α粒子的总能量。造成该现象的原因主要有以下3个。(1)由于是用放射源进行测试,而且测试过程中放射源离探测器较近,所以斜入射很严重。α粒

子斜穿过相邻两灵敏条之间厚度为 6000 \AA 的 SiO_2 栅时,可损失大约 0.12 MeV 的能量,所以沉积到探测器中的能量信号就会相应减小。(2) 硅条间有隔离栅。当硅条上加电压时,栅附近的耗尽区电场会产生畸变,在栅中央处几乎没有电场,因此在这一区域内被 α 粒子电离产生的载流子收集很慢。空穴的漂移速度仅为电子漂移速度的 $1/10$,其被正面电极收集前有很大几率被复合,从而也使收集到的总电荷有损失。(3) 由于等效耦合电容的存在,在某条上收集到信号电荷时,在相邻条上感应出伪信号,即真正的 crosstalk。

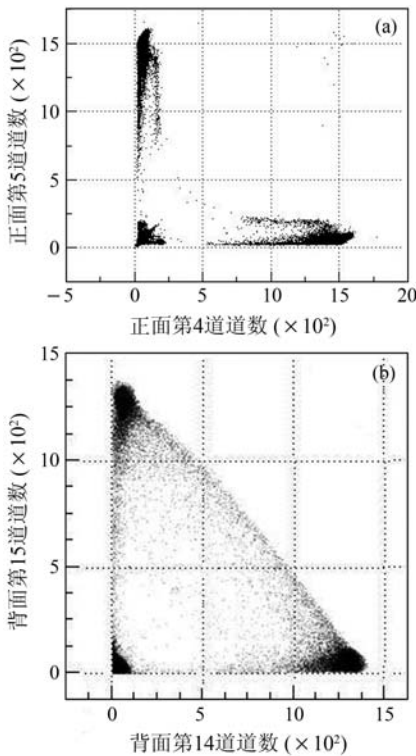


图 3 相邻两条的二维能谱

(a) 正面相邻两条的二维能谱, (b) 背面相邻两条的二维能谱。

^{241}Am 放射源从正面入射时背面相邻两条的二维能谱图如图 3(b) 所示。由于该源的 α 粒子在硅中的行程比较短 ($\sim 30 \mu\text{m}$), 而且仅有正面的电场畸变区对载流子有影响, 背面的电场畸变区对载流子没有影响。由于背面电极收集的是电子载流子, 漂移速度快, 被复合几率相应减小, 所以背面相邻两条的二维能谱图主要部分为一条在横坐标和纵坐标截距相等的直线, 其信号总能量等于 α 粒子全部沉积在探测器中的能量。需要指出的是, 图中直线非理想直线, 而是稍稍向上弯曲, 这是电子学非线性造成的。

性造成的。

从这种方法测得的探测器 crosstalk 水平, 正面在 6% 左右, 背面在 1% 左右。根据以上分析可知, 这一数据比真正意义上的 crosstalk (即用脉冲源方法测得的 crosstalk) 要高。

在相同的测试条件下对进口 Micron BB1 硅条探测进行了同样测试。该进口厚度 $1000 \mu\text{m}$, 每一面有 40 条, 条宽为 $1000 \mu\text{m}$, 体电容 20 pf , 全耗尽电压为 170 V , 隔离栅宽度为 $150 \mu\text{m}$ 。该探测器的能量分辨率和 crosstalk 水平均在 1% 左右 (如图 4)。

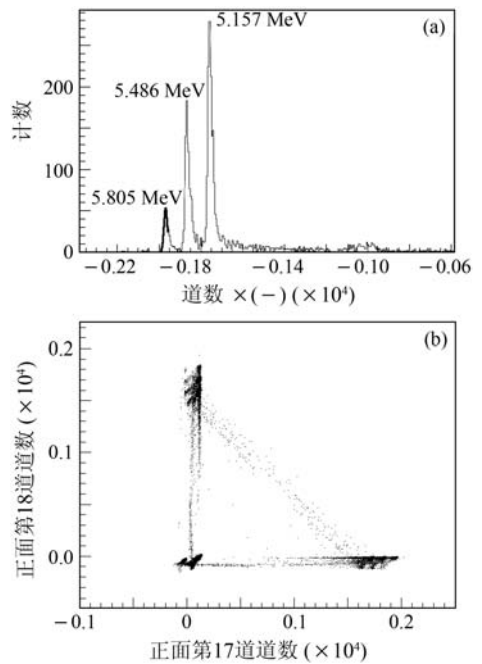


图 4 Micron BB1²³⁹Pu α 源能谱

(a) 一维能谱, (b) 二维能谱。

4 总结

进口硅条探测器的各条能量分辨率较为均匀, 均在 1% 左右。我们制作的双面硅条探测器的正面能量分辨率在 1.5% 左右, 背面的能量分辨率在 3% 左右, 探测器条均匀性还不够好, 工艺还有待进一步提高。进口探测器相邻两条之间也有 crosstalk (见图 4(b)), 其背面 crosstalk 水平在 1% 左右, 与国产探测器相当, 其更多地反映了斜入射时能损被相邻两条共同收集的事实而非真正的 crosstalk。正面 crosstalk 水平在 1% 左右, 比国产探测器要好。通过比较可以看出, 在关键参数如条均匀性、能量分辨率、crosstalk 水平等方面, 国内研制的探测器

与进口探测器相比还是有些差距, 这需要我们进一步严格控制工艺条件, 改善工艺参数。相信随着工艺的不断提高, 探测器的性能会得到明显的改善。

参考文献 (References):

- [1] Xie Yigang, Chen Chang, Wang Man, *et al.* Particle Detectors and Data Acquisition (in Chinese). Beijing: Science Press, 2003, 220–258(in Chinese).
(谢一冈, 陈昌, 王曼, 等. 粒子探测器与数据获取, 北京: 科学出版社, 2003, 220–258.)
- [2] Abt I, Masciocchi S, Moshous B, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2000, **A439**: 442.
- [3] Bruner N L, Frautschi M A, Hoferkamp M R, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1995, **A362**: 315.
- [4] Richter R H, Andricek L, Gebhart T, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1996, **A377**: 412.
- [5] Ambrosi G, Babucci E, Battiston R, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1995, **A361**: 97.
- [6] Gurov Yu B, Katulina S L, Sandukovsky V G, *et al.* Nuclear Experimental Technique, 2005, **A48**: 703.
- [7] Davin B, de Souza R T, Yanez R, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2001, **A473**: 302.
- [8] Hofmann S. Nucl Instr and Meth. 1997, **B126**: 310.
- [9] Yuan Xiaohua, Hu Rongjiang, Wang Hongwei, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, 2005, **25**(3): 259(in Chinese).
(袁小华, 胡荣江, 王宏伟, 等. 核电子学与探测技术, 2005, **25**(3):259.)
- [10] Zou Hong, Chen Hongfei, Zou Jiqin, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, 2007, **27**(2): 170(in Chinese).
(邹鸿, 陈鸿飞, 邹积清, 等. 核电子学与探测技术, 2007, **27**(2):17.)

Test of Double-sided Multi-strip Silicon Detectors^{*}

LI Zhan-kui^{1, 1)}, GONG Wei^{1, 2}, TAN Ji-lian¹, WEI Ji-fang^{1, 2}, WANG Zhu-sheng¹,
HAN Li-xiang¹, TIAN Da-yu³, YU Min³, WANG Jin-yan³, ZHANG Lu³

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 Institute of Microelectronics of Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The testing of a doubled-sided multi-strip silicon detector manufactured by Institute of Modern Physics of CAS and Peking University were introduced. The electrical characteristics and energy resolution, two-dimensional spectrum, crosstalk were presented. The reverse leak current of each strip is smaller than 10 nA under bias voltage of 25 V. The energy resolution of strips on the front side is about 1.5%, but a little worse for the backside strips, about 3%. The level of crosstalk is about 6% for the front side, 1% for the backside. Same tests were carried out on the commercial Micron BB1 detector and a comparison was presented.

Key words: double-sided multi-strip silicon detector; electrical characteristics; energy resolution; crosstalk

* Received date: 29 Dec. 2010; Revised date: 18 Jan. 2011

* Foundation item: Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJXC3-SYW-No5)

1) E-mail: lizhankui@impcas.ac.cn