

## 硅多条探测器的研制和初步应用\*

谭继廉<sup>1;1)</sup> 靳根明<sup>1</sup> 王宏伟<sup>1</sup> 段利敏<sup>1</sup> 袁小华<sup>1</sup> 王小兵<sup>1</sup> 李松林<sup>1</sup>  
卢子伟<sup>1</sup> 徐珊珊<sup>1</sup> 宁宝俊<sup>2</sup> 田大宇<sup>2</sup> 王玮<sup>2</sup> 张录<sup>2</sup>

1(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2(北京大学微电子研究所 北京 100871)

**摘要** 描述了用微电子工艺技术成功研制硅多条探测器的制备工艺技术及测试结果. 这种探测器的灵敏面积为  $50\text{mm} \times 20\text{mm}$ . P 掺杂面被等分成相互平行的, 长度为  $20\text{mm}$ , 宽度为  $3\text{mm}$  的 16 条, 相邻条之间的间距为  $140\mu\text{m}$ . 当探测器工作在全耗尽偏压下, 每一条的反向漏电流的典型值  $< 2\text{nA}$ . 对  $^{239}\text{Pu}$   $\alpha$  粒子的能量分辨为  $0.5\%—0.9\%$ , 相邻条之间的相互影响(crosstalk)为  $4\%—8\%$ . 用于  $7.2\text{MeV/u}$  的 C 束离子测量, 得到能量分辨为  $0.27\%$ .

**关键词** 硅多条探测器 微电子工艺 电特性 探测特性 漏电流 能量分辨率

### 1 引言

位置灵敏探测器对于高能物理和核物理都是十分重要的. 在核反应中, 为了得到核-核碰撞过程及其动力学信息, 必须探测出射粒子的角分布或者出射粒子的角关联. 例如在核反应中, 弹性散射的角分布直接反映了核势的大小和角动量的贡献. 上述的测量必须借助于位置灵敏探测器来完成. 几十年来, 随着高能物理和核物理的发展, 位置灵敏探测器的发展也经历了不同的发展阶段, 采用了不同的工艺、技术来制备. 就半导体 Si 位置灵敏探测器而言, 曾采用面垒、扩散及离子注入等技术制备. 随着半导体工艺技术的发展, 一种用微电子工艺技术制备的 Si 微条探测器首先在高能物理中得到了广泛的应用. 例如近十多年来, 世界各大高能物理实验室, 几乎都采用它作为顶点探测器. 在核医学 CT 及其他数字化图像方面也有应用, 这主要是因为它具有非常好的位置分辨率、优良的能量分辨率、非常快的时间响应及很宽的线性范围等优点. 为适应核物理研究的发展, 我们研制了 Si 多条探测器, 这种探

测器可用于高粒子多重性的中能重离子碰撞研究, 作为粒子鉴别的  $\Delta E$  探测器; 在低能区超重核合成中, 用作余核注入探测器, 通过对相继衰变的  $\alpha$  粒子进行时间、位置的关联测量来指认目标核等等. 这种探测器具有广阔的应用前景.

### 2 Si 多条探测器的结构及工作原理

Si 多条探测器的结构示意图如图 1(a). 图 1(b) 为实物照片. 探测器的灵敏面积为  $50\text{mm} \times 20\text{mm}$ , 前面(P 面)分为相互平行, 宽度相等的 16 条, 每条宽为  $3\text{mm}$ , 长为  $20\text{mm}$ , 相邻条之间的间距为  $140\mu\text{m}$ . 硅片厚度为  $300\mu\text{m}$ . 前面进行 P 掺杂. 背面进行  $\text{N}^+$  掺杂并在其上蒸 Al 电极、不分条. 当探测器加上反向偏压时, 随着偏压的增加, 其耗尽层(I 区)不断加厚. 反向偏压适当高时(例如  $\geq 30\text{V}$  时)探测器处于全耗尽状态. 当带电粒子穿过或被阻止在 I 区时, 该粒子所损失的能量要产生其数量与该能量成正比的电子-空穴对. 在电场作用下, 这些电子、空穴分别向背电极和前电极运动, 电极上的收集信号即反映了

2004-08-20 收稿

\* 中国科学院知识创新工程重点方向性项目(KJ951-A1-01)资助

1) E-mail: dtstjl@lzb.ac.cn

粒子能损的信息. 每一硅条可视为一独立的探测器, 从每一条的前电极可引出能损信号.

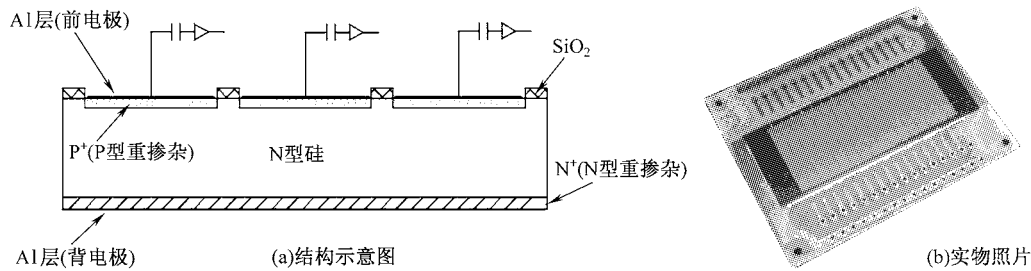


图 1 Si 多条探测器的结构示意图和实物照片

### 3 硅多条探测器的制备

制备硅多条探测器所采用的硅材料为经过抛光的直径为 0.1016m 的标准优质高阻 N 型 Si 片, 电阻率为 8 000—12 000 $\Omega \cdot \text{cm}$ , 厚度为 300 $\mu\text{m}$ , 晶向 [111], 荷电载流子寿命为 1—3ms.

主要工艺流程分为以下几个步骤: 1) 表面氧化钝化: 标准的 4" 硅片经清洗后, 在 1030 $^{\circ}\text{C}$  下生成 700 nm 的氧化层; 2) 光刻探测器灵敏区窗口; 3) 离子注入: 探测器开窗的一面注入 B 离子, 退火形成 PN 结; 4) 去掉片子背面的 SiO<sub>2</sub> 层, 注入磷离子 (高浓度) 退火形成欧姆接触; 5) P<sup>+</sup> 面刻孔, 溅射 Al, 低温合金形成电极; 6) 氧化层区域反刻, 去掉 Al 层; 7) N<sup>+</sup> 面 Al 金属化. 该工艺流程的每一步都是十分重要的, 要求也非常严格, 尤其以下几方面最为关键:

首先, 氧化层的质量对探测器的性能有决定性影响, 尤其是漏电流, 所以, 严格控制氧化条件非常重要. 而在氧化层生长前和生长时, 系统都经 Cl 离子处理, 这主要是因为 (Cl<sup>-</sup> 离子主要分布在 Si-SiO<sub>2</sub> 界面附近) 它能较多地填补氧的空位, 形成 Si-Cl 负离子中心, 从而控制和减少氧化层的固定正电荷和可动正电荷, 减少界面态密度. Cl<sup>-</sup> 离子还能明显地吸除晶体中的有害杂质和缺陷, 提高少子寿命和氧化层质量, 减少漏电流.

其次, 少子寿命是晶体材料完整性和掺杂浓度的重要表征, 漏电流和少子寿命成反比关系, 长寿命的芯片做成 PN 结后, 如能保持或增加少子寿命, 则可望得到很低的漏电流. 但高阻材料很容易引入杂质污染, 所以要从清洗液、器具、氧化气体和管道、离子注入和退火工艺、光刻以及金属化每道工序要严格要求, 保持高度清洁, 并尽量简化工艺流程来严防杂质污染. 另外, 为了保持材料晶格完整, 避免少子

寿命减少, 本项研究中, 采用高温工艺后的缓降温和背面磷吸杂技术, 结果证明是成功的.

### 4 硅多条探测器的性能测试

#### 4.1 电特性

硅多条探测器的  $I$ - $V$  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. 当反向工作偏压由 0V 增加到 100V (扫描) 时, 漏电流可动态显示成一条曲线. 图 2 示出了某一块芯片 (J3R) 上的 16 硅条探测器的反向漏电流与工作偏压的关系, (室温 25 $^{\circ}\text{C}$ ), 由图可见, 这块芯片上的 16Si 条探测器的反向漏电流均小于 3nA.

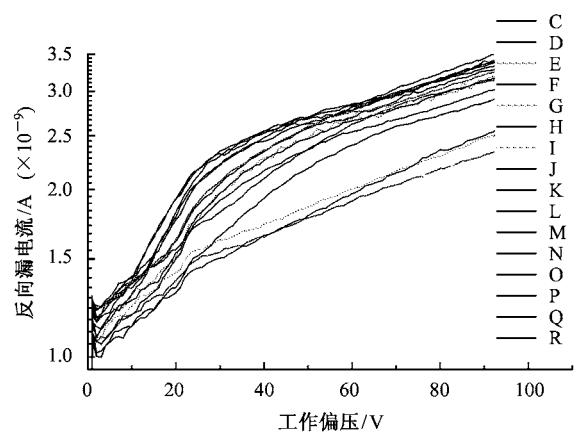


图 2 一块芯片上的 16 硅条探测器的反向漏电流与工作偏压的关系曲线

表 1 列出了 J3R 芯片上的 16 硅条探测器在室温 25 $^{\circ}\text{C}$ , 50V 工作偏压下的漏电流, 在此条件下, 漏电流均小于 2nA.

表 1 芯片 J3R 上 16 硅条探测器的反向漏电流  
(工作偏压 50V, 室温 25℃)

硅条号	反向漏电流/nA	硅条号	反向漏电流/nA
1	1.215	9	1.261
2	1.439	10	1.145
3	1.563	11	0.919
4	1.551	12	0.937
5	1.113	13	1.032
6	1.037	14	1.016
7	1.469	15	1.056
8	1.434	16	1.026

探测器的反向漏电流主要由产生电流、扩散电流和表面漏电流 3 部分组成。在室温下,硅 PN 结反向扩散电流典型值为  $10^{-12} \text{A/cm}^2$ , 其反向产生电流典型值在  $10^{-9} \text{A/cm}^2$  量级。对于 Au-Si 面垒探测器而言,其表面漏电流要比上述两部分大得多,因此 Au-Si 面垒探测器的反向漏电流主要由表面漏电流决定,而在本文所采用的 IC 工艺中,由于有表面钝化及 Cl 离子处理等措施使其表面漏电流降到与反向产生电流相比拟的水平。反向产生电流有关系式  $I_{\text{gen}} \propto (V_{\text{bi}} + V)^{1/2}$ , 可见,器件未达到全耗尽以前其反向产生电流会随着反向工作偏压的增加而增加。

硅多条探测器的 C-V 特性是电容随着工作偏压的增加而减少的。当工作偏压到达 30V 时,曲线有一拐点,其后基本上不再变化,如图 3 所示。这表明,此时探测器已全耗尽。

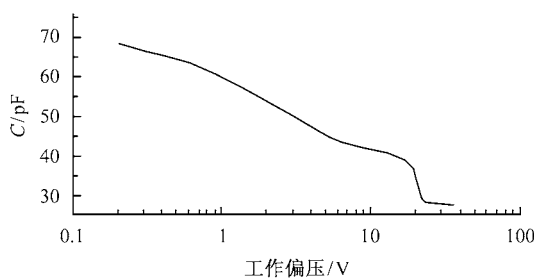


图 3 硅多条探测器的电容随工作偏压变化曲线

### 4.2 探测特性

硅多条探测器已用  $^{239}\text{Pu}$   $\alpha$  源(在真空中)进行了检测。在硅多条探测器处在全耗尽情况下,当  $\alpha$  粒子从前窗(P 面)入射探测器时,得到能量分辨为 0.48%—0.99%。可见这种探测器的能量分辨是非常好的。图 4 示出了  $^{239}\text{Pu}$   $\alpha$  粒子从硅多条探测器的某一条 P 面入射时所得到的能谱。当  $\alpha$  粒子从硅多

条探测器背面(N 面)入射时,得到的能量分辨为 1.17%—1.49%,  $\alpha$  粒子从探测器背面入射能量分辨变差,主要原因在背面有约  $1.5\text{--}2.0\mu\text{m}$  的  $\text{N}^+$  层以及厚约  $0.5\mu\text{m}$  的 Al 层,这两部分构成了探测器背面的死层,会造成  $\alpha$  粒子的能量分散。

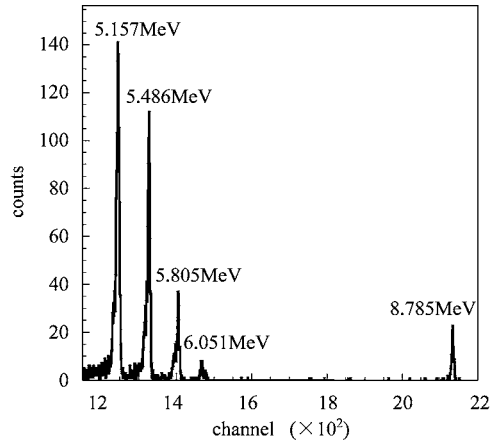


图 4 用硅多条探测器(某一条)测得的  $^{239}\text{Pu}\text{-Thc-c}'$   $\alpha$  粒子能谱(P 面入射)

该探测器已用于精确测量兰州重离子加速器 SFC 的出射粒子能量。图 5 示出了用硅多条探测器所测得的 SFC C 离子能谱。测得 C 离子能量  $7.2\text{MeV/u}$ , 能量分辨 0.27%。

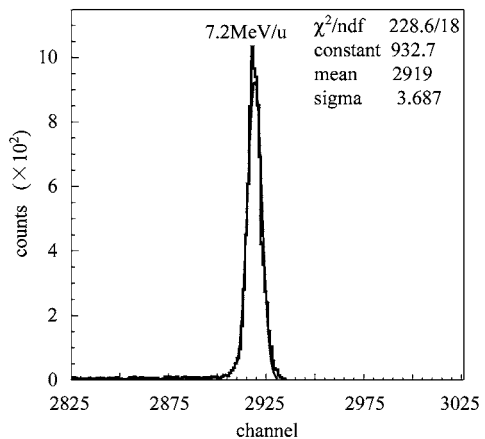


图 5 用硅多条探测器测得的兰州重离子加速器 SFC 的 C 束流能量

与其他探测器相比,硅多条探测器的一个特殊问题是相邻 Si 条之间信号的相互影响(crosstalk),即当带电粒子从一个芯片上的两相邻硅条之间的边界区域入射时,会有相互影响(crosstalk)发生,图 6 示出了当  $\alpha$  粒子从我们测试的 Si 多条探测器的第 9 硅条和第 10 硅条间的边界区域(包括它们之间的间隔区域)入射时,所发生的 crosstalk 情况,测量结果

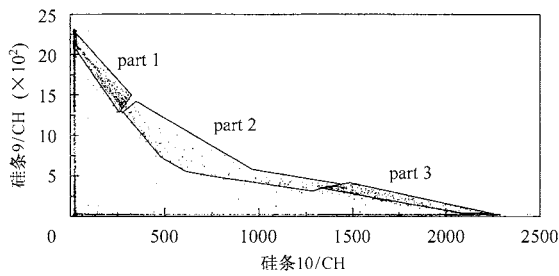


图 6  $\alpha$  粒子从探测器 P 面入射时, 硅条 9 和硅条 10 之间的 crosstalk 效应

表明,当  $\alpha$  粒子从 P 面入射时, crosstalk 大约为 8%, 当  $\alpha$  粒子从背面(N 面)入射时, crosstalk 大约为 4%. 但相隔硅条间没有影响. crosstalk 带来的影响是实验中这一部分数据将丢失.

## 5 结论

1)采用微电子工艺技术来研制硅多条探测器已获成功,该探测器具有优良的电特性和探测特性.

2)由于在工艺流程中严格控制 and 严格操作,并采取特殊的措施,例如 Cl 离子处理,减少了  $\text{SiO}_2$  层中的正电荷. 并减少了  $\text{SiO}_2$ -Si 界面附近的表面态,其结果是减少了反向漏电流.

3)选择优质高阻硅单晶片,并采用慢降温退火和芯片背面磷吸杂工艺,保持高阻晶片完美晶格和长的少子寿命,可有效减少漏电流.

4)相邻条间的 crosstalk 比较严重,要进一步分析原因,以便在以后的制备工艺中予以改进.

## 参考文献 (References)

- Hyams B, Koetz Cem U et al. Nucl. Instr. & Meth., 1983, **205**: 99—105
- Dutta S, Berger G et al. Nucl. Instr. & Meth. In Phys. Res., 2002, **A476**: 739—743
- Kemmer J, Burger P, Henck R et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1982, **NS-29**: 733—737
- NING Bao-Jun, ZHANG Tai-Ping, ZHANG Lu et al. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, **23**(2): 174—177 (in Chinese) (宁保俊, 张太平, 张录等. 半导体学报, 2002, **23**(2): 174—177)
- Sueva D, Spassov V, Chikov N et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1993, **NS-40**: 257
- Dulla Betta G F, Pighatel GU et al. Nucl. Instr. & Meth. In Phys. Res., 1997, **A395**: 344

## Development of Si Multi-Strip Detector\*

TAN Ji-Lian<sup>1;1)</sup> JIN Gen-Ming<sup>1</sup> WANG Hong-Wei<sup>1</sup> DUAN Li-Min<sup>1</sup>  
 YUAN Xiao-Hua<sup>1</sup> WANG Xiao-Bing<sup>1</sup> LI Song-Lin<sup>1</sup> LU Zi-Wei<sup>1</sup>  
 XU Hu-Shan<sup>1</sup> NING Bao-Jun<sup>2</sup> TIAN Da-Yu<sup>2</sup> WANG Wei<sup>2</sup> ZHANG Lu<sup>2</sup>

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

2(Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** The technics and test results and preliminary applications of Si multi-strip detector fabricated by using microelectronic technique were described in this paper. The sensitive area of this kind of detector is  $50\text{mm} \times 20\text{mm}$ . The P side surface was divided into equal 16 strips with  $140\mu\text{m}$  spece between two strips, each one having length of 20mm and width of 3mm. A reverse leakage current less than 2nA and an energy resolution of 0.4%—0.9% (for  $^{239}\text{Pu}$   $\alpha$  particles) and a crosstalk between neighboring strips of 4%—8% have been obtained when the detector was operated in full depletion condition. An energy resolution of 0.27% was achieved for measuring of 7.2MeV/u C ions.

**Key words** Si multi-strip detector, microelectronic technique, electronic performance, detection performance, leakage current, energy resolution

Received 20 August 2004

\* Supported by CAS Knowledge Innovation Project(KJCX2-SW-No7)

1)E-mail: dtstjl@lzb.ac.cn