

平面工艺辐射探测器的研制

张太平¹ 张 录¹ 宁宝俊¹ 田大宇¹ 刘诗美¹ 王 珩¹ 张洁天² 郭昭乔³ 陈世媛³

(1 北京大学微电子所, 北京 100871)

(2 北京大学物理系, 北京 100871)

(3 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 使用高阻 Si 材料, 通过氧化、光刻、注入和退火工艺技术研制粒子探测器——PIN 二极管。采取 HCl 氧化、慢降温等工艺措施可减小 PIN 二极管的暗电流(反向电流), 这对于提高器件性能起到了关键作用。电压为 -5V 时, 探测器的暗电流可达 nA/cm^2 量级。讨论了器件暗电流与少子寿命的关系。

关键词: PIN 二极管; 暗电流; 复合中心; 少子寿命

EEACC: 7230

中图分类号: O572.11

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)03-0354-04

1 引言

粒子的探测一般是通过粒子辐射性来实现的, 这种测量方法叫做直接探测^[1]。其原理是: 当粒子进入硅二极管后在半导体硅材料中产生电子-空穴对, 电子-空穴对的数目与粒子辐射能量直接相关。在电场作用下, 电子-空穴对分别流向正极和负极。这就是说, 电流的大小可以反映出粒子辐射能量。另一种是间接测量方法^[1,2], 如 X 射线。因 X 射线没有电荷, 它不能使硅晶体直接产生电子-空穴对。但通过对硅原子的作用, 引起碰撞, 原子获得的能量等于射线能量的损失。原子的振动也能激发电子-空穴对, 这叫做二次作用。X 射线同硅原子的作用成为探测 X 射线的重要因素。高能粒子 α 、 β 、 γ 、X 射线引起的宽范围闪烁电流正是测量的根据。

辐射探测器——PIN 二极管用于高能物理基本粒子基础研究中。随着研究工作的深入, 粒子探测器将会有更加广泛的用途。

PIN 二极管结构简单, 生产工艺也不复杂, 但由于对管子参数要求很高, 世界上只有少数国家, 如挪

威、日本有这种产品, 其价格昂贵。国外制作这种探测器所用的材料是高阻硅单晶, 探测器的面积约数百平方毫米, 暗电流可达 nA/cm^2 量级。目前国内研制这种器件的单位很少, 还没有这种产品。我们使用 $500\Omega \cdot cm$ 的 N 型硅片研制成功了 PIN 二极管。二极管反向电压为几伏时, 电流密度达到了几个 nA/cm^2 的水平。

2 工艺流程

在工艺流程中保持表面氧化层的清洁和晶体的完美是及其重要的。我们制定了严格的操作规程, 以避免污染。通过以下工艺步骤, 制成了符合使用要求的二极管。

高阻晶片经过标准的半导体清洗工艺, 送进氧化炉。条件是: $1030^\circ C$, 氧气 + 三氯乙烯, 恒温 3h; 炉温降至 $1000^\circ C$, 氧气 + 氮气, 氧化退火 1h; 降温至室温, 在降温过程中要保持 $2^\circ C/min$ 的速率^[3]。生长氧化层厚度约 300nm; 光刻有源区, 腐蚀时留下 70nm 的氧化层作为表面注入保护层; 硼离子注入, 条件: 30keV, 剂量 $5 \times 10^{14}/cm^2$; 去片子背面 SiO_2 注磷,

张太平 男, 1944 年出生, 高级工程师, 从事半导体器件和光刻工艺研究工作。

宁宝俊 女, 副研究员, 从事半导体器件和 VLSI 测试研究。

张洁天 女, 副教授, 从事实验教学和计算机应用研究。

2000-01-06 收到, 2000-11-01 定稿

©2001 中国电子学会

条件是 50keV, 剂量 $2 \times 10^{15}/\text{cm}^2$. 炉退火 600°C, 30min; 900°C, 2min. 刻孔后溅射铝并光刻出铝电极. 焊接电极部分铝厚 1.2μm, 其它部分的铝约是 0.2μm. 如果只刻出了引线环, 那就只留 1.2μm 的部分. 为了保证探测器的可靠性, 防止硅吃铝, 在硅铝之间溅射 50nm 的钛金属层. 400°C 合金 30min.

3 测试和讨论

3.1 减小暗电流(反向电流)是制造粒子探测二极管的关键

探测二极管的灵敏度和分辨率是由二极管的面积、耗尽层宽度和暗电流决定的. 因此减小暗电流是制造探测二极管的关键. 我们使用 HP4156B 测试仪对 PIN 二极管进行了测试. 图 1 是样品(C13-AL)的 $I-V$ 曲线.

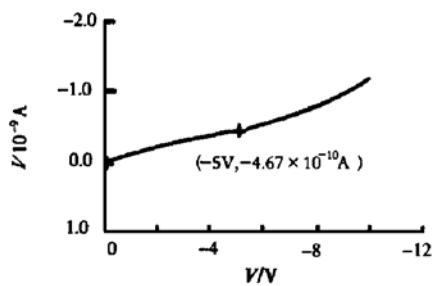


图 1 PIN 二极管(C13-AL) $I-V$ 曲线

FIG. 1 $I-V$ Curve for PIN Diode

由图所示, 电压为 -5V 时, 暗电流为 4.67×10^{-10} A. 器件面积是 13mm^2 , 因此暗电流密度为 $35.92 \times 10^{-10}\text{A/cm}^2$. 我们对国外同类样品也进行了测试. 在同样条件下, 其样品的暗电流密度为 $68.3 \times 10^{-10}\text{A/cm}^2$, 我们的样品略好于国外样品.

需要指出的是: (1) 由图 1 的 $I-V$ 曲线可以看出, 随着反向电压加大, 暗电流增加较快, 这反映出表面氧化层还不够清洁、晶体不够完美. (2) 上述测量是在二极管做铝电极之后进行的, 在做铝电极之前暗电流密度为 $16.2 \times 10^{-10}\text{A/cm}^2$, 很可能在制作铝电极的工艺过程中引进了污染.

3.2 二极管暗电流和少子寿命的关系

PIN 二极管暗电流和表面氧化层及内部晶体相关. 少子寿命是晶体材料完整性和杂质程度的重要表征^[4]. 由图 1 可知, PIN 二极管反向电流的实测值

比理论计算值要大. 引起这一差别的原因有^[5]: (1) 表面效应; (2) 耗尽区的产生和复合. PN 结处于热平衡态时, 势垒区内通过复合中心的载流子产生率等于复合率. 当 PN 结加反向电压时, 势垒电场加强, 由于热激发作用, 通过复合中心产生的电子-空穴对来不及复合就被强电场拉走了. 也就是说势垒区内通过复合中心的载流子产生率大于复合率, 具有净产生率, 就形成了一部分反向电流, 称为势垒区的产生电流, 以 I_g 表示. 如果 PN 结面积为 A , 势垒区宽度为 X_D , 净产生率为 G , 它表示单位时间单位体积内势垒区内所产生的载流子数目, 那么

$$I_g = qGX_D A$$

在势垒区内, 本征载流子浓度 n_i 远远大于电子浓度 n 、空穴浓度 p ; 设复合中心能级与本征能级重合, 那么根据半导体非平衡载流子理论公式, 可以推导出势垒区内净复合率 U 为

$$U = -n_i/2\tau$$

式中 τ 即为少子寿命. 实际上这个负的净复合率就是净产生率 G ,

$$G = -U = n_i/2\tau$$

因此

$$I_g \approx qn_iX_D A / 2\tau$$

这就是暗电流和少数载流子寿命的关系式^[3, 5]. 暗电流和少子寿命成反比关系, 少子寿命越长, 暗电流越小. 原材料的电阻率高, 少子寿命长, 才有可能作出好的器件. 长寿命的晶片制成 PN 结后, 如果能保持或增加少子寿命, 探测器的暗电流才可能比较小.

为此, 我们对硅材料和二极管的少子寿命进行了监测. 少子寿命的测试是由北京大学物理系实验中心进行的. 采用光注入方法, 使用计算机“多路智能检测系统”对光响应过程进行实时采集, 由衰减曲线即可知少子寿命 τ . 图 2 是该材料的光响应曲线, 由曲线可知少子寿命约 6ms. 图 3 是注入硼、磷并经过退火后, 测出的二极管的光响应曲线, 其少子寿命大约为 2ms. 这说明在制作二极管的工艺过程中存在污染, 使得少子寿命减小了. 这与前面由 $I-V$ 曲线得出的结论是一致的.

3.3 提高表面氧化层质量是减小二极管反向漏电流的另一关键

二极管的反向电流主要由体电流和表面漏电流两部分组成. 为了减少表面效应, 氧化层生长很关

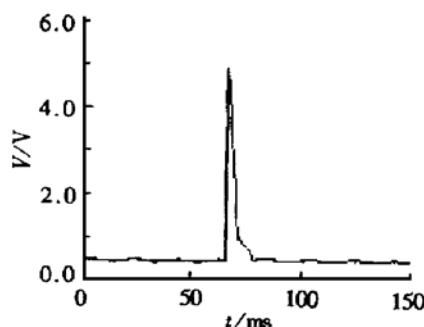


图 2 硅材料的光响应曲线

FIG. 2 Light Response of Si Material

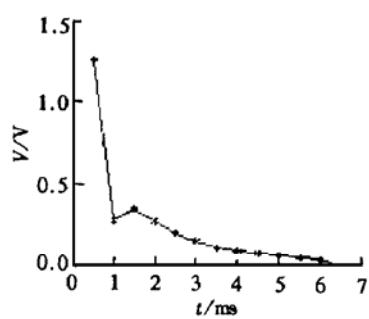


图 3 二极管的光响应曲线

FIG. 3 Light Response of Diode

键。氧化层生长前和生长过程中,系统都经 Cl 离子处理,以尽量减少氧化层中的固定电荷和可动电荷。对氧化层进行 C-V 测试,氧化层中的固定电荷 $\leq 4.1 \times 10^{10}/\text{cm}^2$,可动电荷 $\leq 6.7 \times 10^9/\text{cm}^2$ 。生长氧化层是高温过程,高温后要慢速降温以减少缺陷和防止硅片翘曲。硼离子注入窗口留下 100nm 左右的氧化层,以防止注入时有些快扩散物质^[3,6](如 Cu, Cr 等)进入硅晶体内,同时有效地避免高能注入造成的损伤和污染。有文献^[7]表明,带薄氧层注入和直接对硅面注入,对暗电流的影响,可以减少约一个量级。

4 结论和建议

制造 PIN 二极管探测器工艺步骤虽然不多,但

做出合格器件并不容易。首先它的面积很大,一般都在几十 mm^2 。第二,反向电流要小($< 10^{-9}\text{A}$),很小的局部污染或损伤,都会引起整个晶片的变化,使反向电流增大。因此要特别注意工艺过程的每个细小环节,重要的有以下几点:

1. 氧化工艺中用 Cl 离子处理系统显著减少氧化层电荷及硅/二氧化硅界面的界面态密度。氧化层固定电荷要小于 $5 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 和界面态密度要小于 $5 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ 。当然氧化层中电荷数越少越好。
2. 高温后的降温速率要慢,本试验采用 $2^\circ\text{C}/\text{min}$ 。主要为防止片子翘曲和产生缺陷。
3. B^+ 注入时,窗口一定要留下薄氧化层。这是为了保护硅表面,防止高能离子的轰击造成缺陷污染。最好再盖一层薄铝,以减少针孔。
4. 制成铝电极后,合金温度不能太高,应小于 450°C ;时间不能太长,应小于 30min。
5. 为了保证可靠性,还要做一层钝化层。

参考文献

- [1] Hamamatsu Photonics K. K., Solid State Division, 1126-1, Ichino-cho, Hamamatsu City 435-91, Japan Cat. No. KOTH0002E04 Jan., 1997 T Printed in Japan (1, 500).
- [2] Josef A. Kemmer, Paper Presented at Transducers '87, TOKYO, June 2-5, 1987.
- [3] K. Aite, P. Hari, W. Bijkér and J. Middelhoek, Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, A305 (1991), 533-540, North-Holland.
- [4] WANG Yangyuan, Integrated Circuit Industry, Technology, Economics, Management[王阳元, 集成电路工业全书, 技术·经济·管理].
- [5] LIU Enke, ZHU Bingshenget al., Physics of Semiconductors, 1981[刘恩科, 朱秉升, 等, 半导体物理学, 1981].
- [6] G. Bohm and J. I. Kim J. Kemmer, Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, 1991, A305: 587—599.
- [7] Wei Chen, Hobart W. Kraner, Zheng Li and Pavel Rehak, IEEE Trans. Nuclear Science, 1994, 41(4): 941—947.

Fabrication of Si Radiation Detector with Plane Technology

ZHANG Tai-ping¹, ZHANG Lu¹, NING Bao-jun¹, TIAN Da-yu¹, LIU Shi-mei¹, WANG Wei¹,
ZHANG Jie-tian², GUO Zhao-qiao³ and CHEN Shi-yuan³

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

(2 Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

(3 China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The fabrication of PIN silicon detector has been described in details with some advanced microelectronic technologies, including oxidation, lithography and implantation and annealing. Slowly decrease the temperature after HCl handling, a low dark current (reverse current) can be obtained. At - 5V, the performance of the detector is perfect, and the leakage current is $10\text{nA}/\text{cm}^2$. The relationship between the dark current and the minority carrier lifetime has also been discussed, as well as the measuring method of the minority carrier lifetime.

Key words: PIN diode; dark current; recombination center; minority lifetime

EEACC: 7230

Article ID: 0253-4177(2001)03-0354-04

ZHANG Tai-ping male, born in 1944, is engaged in the research on semiconductor devices and photo etching technology.

NING Bao-jun female, is engaged in the research on semiconductor devices and VLSI measurement.

ZHANG Jie-tian female, is engaged in teaching and research on application of computer.