

# 表面光电压测量 P 型硅抛光片少子 扩散长度及铁杂质含量的研究

屠海令 朱悟新 王 敬 周旗钢 张 椿 孙 燕

(北京有色金属研究总院 北京 100088)

**摘要** 表面光电压法近年来在半导体晶片的电学特性研究中发挥了重要作用 本文简述了该方法的测量原理, 给出了直径 125mm 硅抛光片少子扩散长度及铁杂质浓度的测量数据, 讨论了生产工艺对硅抛光片表面质量的影响

**PACC:** 7220J, 7240, 7280C, 6170R, 8170C

## 1 引言

亚微米及深亚微米超大规模集成电路正遵循摩尔定律迅速发展, 同时也给半导体材料研究及性能检测评价提出了更苛刻的要求和新的课题 对于  $0.5\mu\text{m}$  以下的深亚微米集成电路, 厂家普遍提出硅片总的重金属杂质不得超过  $10^{10}\text{mm}^{-3}$ , 表面金属污染应在  $10^9\text{cm}^{-2}$  数量级 为了使栅极氧化层完整性(GOI)具有较高的质量, 对于 P 型硅抛光片, 表面铁杂质含量应在  $10^8\text{cm}^{-2}$  数量级 与此同时, 经过各道加工工艺后, 硅片应保持较高的少子寿命值 为实现上述要求, 半导体材料及相关领域的研究正广泛展开, 其中包括超净间级别提高、低污染设备的制造、各种低杂质含量化学试剂的研制、标准机械接口系统(SMIF)的使用, 特别是先进的非接触检测方法和设备的研究开发给深亚微米集成电路用硅材料的研究生产提供了有力的工具 本文将介绍一种新的表面光电压(SPV)法, 给出一些使用该方法研究  $\Phi 125\text{mm}$  硅片中的研究结果, 并进一步讨论硅抛光片加工工艺与材料性能间的关系问题

## 2 表面光电压法测量原理和仪器简介

表面光电压是一种非破坏性可全片扫描测量硅抛光片少数载流子扩散长度及表面铁杂质含量的先进测量方法<sup>[1~6]</sup> 该方法不但是研究硅材料性能的有力手段, 同时也进入了集成电路和硅抛光片生产系统, 已成为必不可少的检测工具 目前一种新的表面光电压法可测量

低注入线性表面光电压,其原理图如图 1 所示(见图版 I)。图 1 中,  $V_{FF}$ 、 $V_{FB}$  为正面光照下正表面和背表面的光电压;  $V_{FB}$ 、 $V_{BB}$  为背面光照下正表面和背表面的光电压

在正面光照下,对低注入水平,表面光电压与过剩载流子浓度具有线性关系:  $V_{FF} = C_F \Delta n_{FF}$ ;  $V_{BF} = C_B \Delta n_{BF}$ 。其中,  $C_F$  和  $C_B$  分别为常数,取决于半导体材料的电学性质和被测量半导体材料正表面和背表面势垒大小;  $\Delta n_{FF}$ 、 $\Delta n_{BF}$  分别为正面光照下正表面和背表面的过剩载流子浓度。假定  $z \ll T$  (实际上,只要  $z < T/3$  就足够了),参照文献[7, 8]中关于  $\Delta n_{FF}$ 、 $\Delta n_{BF}$  的公式,可得:

$$V_{FF} = C_F \Phi_F (1 - R_F) F_1(L, S_B, \alpha) \quad (1)$$

$$V_{BF} = C_B \Phi_F (1 - R_F) F_2(L, S_F, \alpha) \quad (2)$$

$$F_1(L, S_B, \alpha) = \frac{\alpha^2 L^2}{\alpha^2 L^2 - 1} \times \left( 1 - \frac{\frac{D}{L S_B} \sinh(T/L) + \cosh(T/L)}{\sinh(T/L) + \frac{D}{L S_B} \cosh(T/L)} \right) \times \frac{1}{\alpha} \quad (3)$$

$$F_2(L, S_F, \alpha) = \frac{\alpha L}{\alpha^2 L^2 - 1} \times \frac{1 + \alpha D/S_F}{\sinh(T/L) + \frac{D}{L S_F} \cosh(T/L)} \quad (4)$$

其中  $R_F$ 、 $R_B$  分别为硅片正表面和背表面的反射率;  $S_F$ 、 $S_B$  分别为硅片正表面和背表面的复合速率;  $L$  为少子扩散长度;  $D$  为硅中少子的扩散常数;  $T$  为样品厚度;  $\alpha$  为吸收系数,  $\alpha = 1/z$ ,  $z$  为光穿透深度

对不同的  $\alpha$ ,  $S_F$  以同一比率使  $V_{FF}$  减少,因而,  $S_F$  对  $V_{FF}$  的影响可包含在(1)式中的常数项内;同样,  $S_B$  对  $V_{BF}$  的影响包含在(2)式的常数项内。采用相同的推导,可以得出背面光照下硅片正表面和背表面的光电压:

$$V_{FB} = C_F \Phi_B (1 - R_B) F_2(L, S_B, \alpha) \quad (5)$$

$$V_{BB} = C_B \Phi_B (1 - R_B) F_1(L, S_F, \alpha) \quad (6)$$

该测量方法的特点之一是只应用正、背表面光电压之比,因此光通量与反射率均抵消,可不予考虑,因而可得以下方程:

$$\frac{V_{BF}}{V_{FF}} = \frac{C_B}{C_F} \times \frac{F_2(L, S_F, \alpha)}{F_1(L, S_B, \alpha)} \quad (7)$$

$$\frac{V_{FB}}{V_{BB}} = \frac{C_F}{C_B} \times \frac{F_2(L, S_B, \alpha)}{F_1(L, S_F, \alpha)} \quad (8)$$

通过以两个不同波长的激光光照样品表面,测得  $V_{FF}$ 、 $V_{FB}$ 、 $V_{BB}$ 、 $V_{BF}$ , 可用数值计算得出  $L$ 、 $S_F$  和  $S_B$  的值

该测量方法的特点之二是能够得到背表面复合速率。这可通过(7)、(8)两式计算得到,也可以假设扩散长度远大于光的穿透深度,即  $L \gg z$ , 通过背表面光电压确定背面复合速率的数值。此时,

$$V_{FB} = C \Phi_B (1 - R_B) (S_B z + D) \quad (9)$$

式中  $C$  为常数。由表面光电压  $V_{FB}$  对光穿透深度  $z$  作图,在  $V_{FB} = 0$  时,可由截距  $z_{in}$  求得背面复合速率  $S_B = D/z_{in}$ 。同样可求得  $S_F$ 。背表面复合速率对于测量超过样品厚度的少子扩散长度值将起重要作用

该方法的第三个特点是可测量 P 型硅中铁杂质浓度。在 P 型硅中的铁是活动的,带正

电并位于间隙位置上,在高温扩散过程中,  $\text{Fe}_i^+$  被带负电且位于替位位置上的  $\text{B}_s^-$  所俘获,形成静电成键的  $\text{Fe}_i^+ - \text{B}_s^-$  对。由于间隙  $\text{Fe}_i^+$  是有效的复合中心,而  $\text{Fe}_i^+ - \text{B}_s^-$  对的复合作用要弱 10 倍,采用较强的波长大于  $0.7\mu\text{m}$  的近红外光辐射被测样品,使 P 型硅样品中的“铁硼对”分解,对比分解前后两次少子扩散长度值,可由下式精确确定硅中铁杂质的浓度:

$$N_{\text{Fe}} = 1.05 \times 10^{16} \left( \frac{1}{L_{\text{aft}}^2} - \frac{1}{L_{\text{bef}}^2} \right) \quad (10)$$

其中  $L_{\text{bef}}$  和  $L_{\text{aft}}$  分别是“铁硼对”分解前后的少子扩散长度

### 3 实验方法

从北京有色金属研究总院批量生产的 P 型  $\Phi 125\text{mm}$  硅抛光片中随机抽出两片(样品 I 和 II)进行 SPV 测量,样品电阻率约为  $20\Omega \cdot \text{cm}$ ,厚度为  $525 \pm 2\mu\text{m}$ 。硅片经过二氧化硅胶体粗抛、精抛光后,进行 RCA 清洗,刷片并经过高纯惰性气体吹洗干净后,检测少子扩散长度。对要测量铁含量的样品,则在第一次测定样品的少子扩散长度后,将样品用波长大于  $0.7\mu\text{m}$  的强红外光照射,时间需大于  $60 \sim 90\text{s}$ ,以保持样品中 95% 以上的“铁硼对”分解,光照后第二次测量少子扩散长度。实验中所用测量仪器为 Semiconductor Diagnostics, Inc 公司的 SPV 仪,型号 CM S2000。

## 4 结果与讨论

### 4.1 少子扩散长度及少子寿命

首先对样品 I 和样品 II 的少子扩散长度进行 177 点扫描测量,图 2(a)、(b) (见图版 I) 分别显示了两样品中 177 点的少子扩散长度数据。样品 I 的少子扩散长度平均值为  $394\mu\text{m}$ , 样品 II 的少子扩散长度平均值为  $403\mu\text{m}$ 。硅中少子寿命  $\tau$  可由公式  $\tau = L^2/D$  计算得到,对于本实验中使用的 P 型硅样品,公式中的  $D$  应为硅中电子的扩散系数。该仪器可通过软件程序直接给出少子寿命值,样品 I 和 II 的平均少子寿命值分别为  $51.6\mu\text{s}$  和  $53.5\mu\text{s}$ 。随后,对样品 I 和 II 的少子扩散长度进行了 3488 点的扫描测量,测得样品 I 的平均少子扩散长度值为  $411\mu\text{m}$ , 样品 II 为  $433\mu\text{m}$ , 其扫描结果示于图 3(a)、(b) (见图版 I)。SPV CM S2000 还可同时给出少子扩散长度扫描测量结果的直方图,177 点扫描测量的直方图如图 4 所示(见图版 II)。从图 4 的直方图中可以看出样品 I 和 II 均具有较好的均匀性和一致性,其中,样品 II 比样品 I 的少子扩散长度平均值高且均匀性更好一些。

### 4.2 背表面复合速率

表面复合速率,特别是背表面的状态及复合速率是影响硅抛光片少子扩散长度测量因素之一。SPV CM S2000 以非接触法不但给出了背表面的复合速率值,同时也以多点扫描测量图反映出硅抛光片背表面状况和均匀性。图 5(a)、(b) (见图版 II) 分别显示了样品 I 和 II 背表面的均匀性,从中可以看出,两个样品的背表面具有相似的图案,反映出背表面加工工艺过程尤其是磨片和化学腐蚀过程仍有待于改进,以进一步提高硅片背表面的均匀性。这一类在前道加工的不均匀性可能在以后的器件工艺中形成不均匀的应力分布或新的二次缺陷。

### 4.3 “铁硼对”分解及铁杂质浓度

P型硅中的铁是当前集成电路制造中的有害杂质之一,对深亚微米级集成电路的栅极氧化物完整性影响极大.硅中“铁硼对”在较低温度下(80~140℃)分解后,形成的间隙铁原子是超大规模集成电路成品率降低的主要原因之一.一些集成电路生产厂家提出了P型硅中铁杂质浓度小于 $10^9\text{cm}^{-3}$ 和表面浓度小于 $10^8\text{cm}^{-2}$ 的苛刻要求.测量如此低浓度的硅中铁含量亦成为主要的研究课题之一. Bergholz<sup>[3]</sup>和 Zoth<sup>[4]</sup>等人提出了以SPV法测量不同温度下硅中少子扩散长度可确定铁的浓度.不久, Lagowski等人<sup>[5,6]</sup>成功地以不同波长的光激发样品,使用SPV法测定了该样品中的铁杂质含量.本实验采用的SPV CM S2000可扫描测量铁杂质浓度,测量范围为 $10^9\sim 10^{14}\text{cm}^{-3}$ (体浓度)、 $5\times 10^7\sim 5\times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ (表面浓度).对样品II中心和1/2直径处对称4点Fe浓度的测量结果分别为: $5.92\times 10^9\text{cm}^{-3}$ 、 $4.05\times 10^9\text{cm}^{-3}$ 、 $10.1\times 10^9\text{cm}^{-3}$ 、 $6.13\times 10^9\text{cm}^{-3}$ 、 $4.94\times 10^9\text{cm}^{-3}$ ,平均值为 $6.23\times 10^9\text{cm}^{-3}$ .测量结果表明样品的铁杂质浓度在 $10^9\text{cm}^{-3}$ 数量级.

### 4.4 抛光片电学特性的均匀性

从图4的直方图可以看出,样品I和II的少子扩散长度均具有较好的均匀性和一致性.这反映出硅单晶的体均匀性较好,同时,硅片正表面的抛光和清洗也较为均匀.铁杂质浓度在 $10^9\text{cm}^{-3}$ 数量级说明硅片受铁的污染很轻.

图5表明:样品I和II背表面的均匀性都较差.说明在硅片的生产过程中,只注意到了对硅片正表面的保护,使其在生产过程中避免受重金属的沾污,并保持表面状态的均匀性,却在一定程度上忽略了对硅片背表面的保护,尤其是在磨片和化学腐蚀时没有完全消除背面的不均匀性,随后的单面抛光更不能消除这种不均匀性.

## 5 结论

这种新的表面光电压法不但能够测量硅片的少子扩散长度及其分布、表面铁杂质的浓度,还能给出硅片背面的复合速率及其均匀性.对两片随机抽检的直径125mm硅抛光片的测量表明:硅片的少子扩散长度在 $400\mu\text{m}$ 左右,具有较好的均匀性和一致性;硅片背面复合速率的均匀性较差;铁杂质浓度在 $10^9\text{cm}^{-3}$ 数量级,样品受铁的污染较轻.

致谢 感谢 Semiconductor Diagnostics, Inc 协助本实验的SPV测试

## 参 考 文 献

- [1] L. Jastrzebski, W. Henley and C. Neuse, Solid State Technology, December, 1992, 27.
- [2] L. Jastrzebski, O. Milic, M. Dexter *et al*., J. Electrochem. Soc., 1993, **140**(4): 1152.
- [3] W. Bergholz, Siemens Forsch, 1987, **16**: 241.
- [4] G. Zoth, Technical Proceedings of SEMICON/Europe '90, Zurich, Switzerland, March, 1990, 24.
- [5] J. Lagowski, P. Edelman, A. M. Kontkiewicz *et al*., Appl Phys Lett, 1993, **63**(22): 3043.
- [6] J. Lagowski, P. Edelman, M. Dexter *et al*., Semicond Sci Technol, 1992, **7**: A185.
- [7] G. Duggan and G. B. Scott, J. Appl Phys, 1981, **52**: 407.
- [8] D. R. Frankl and E. A. Umer, Surface Science, 1966, **6**: 115.

## Study on Surface Photovoltage Measurement of Minority Carrier Diffusion Length and Iron Contamination in P-Type Silicon Polished Wafers

Tu Hailing, Zhu Wuxin, Wang Jing, Zhou Qigang, Zhang Chun, Sun Yan

(General Research Institute for Non-ferrous Metals, Beijing 100088)

Received 12 January 1998, revised manuscript received 23 March 1998

**Abstract** Surface photovoltage (SPV) method plays an important role in the study on electrical characterization of semiconducting wafers in recent years. In this paper, the principle of SPV measurement is introduced, and the measurement data of minority carrier diffusion length and iron contamination in silicon polished wafers with a diameter of 125mm are presented. Effect of manufacturing process on the surface quality of silicon wafers is also discussed.

**PACC:** 7220J, 7240, 7280C, 6170R, 8170C

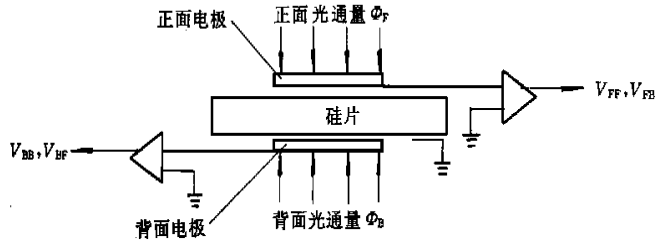


图 1 新的表面光电压法测量原理图

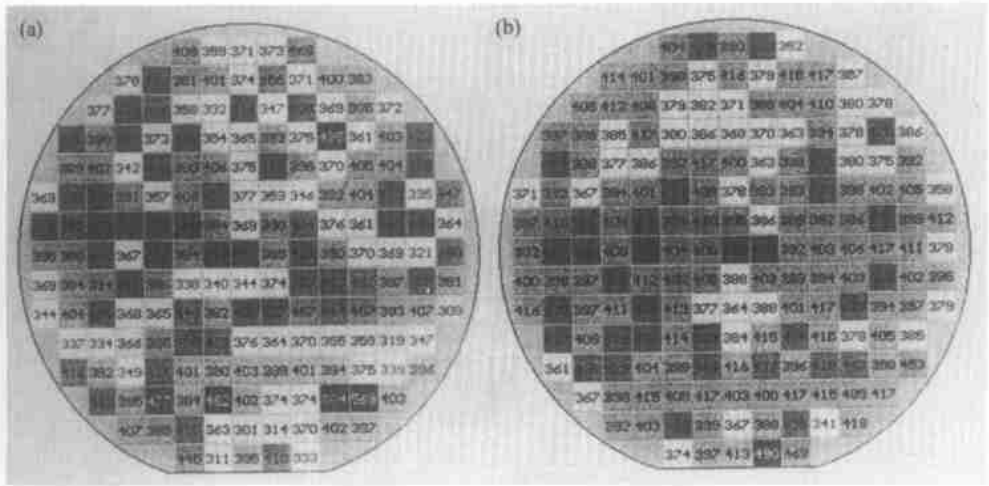


图 2 样品 I 和 II 少子扩散长度 SPV 法 177 点扫描测量结果分布图

(a) 样品 I; (b) 样品 II.

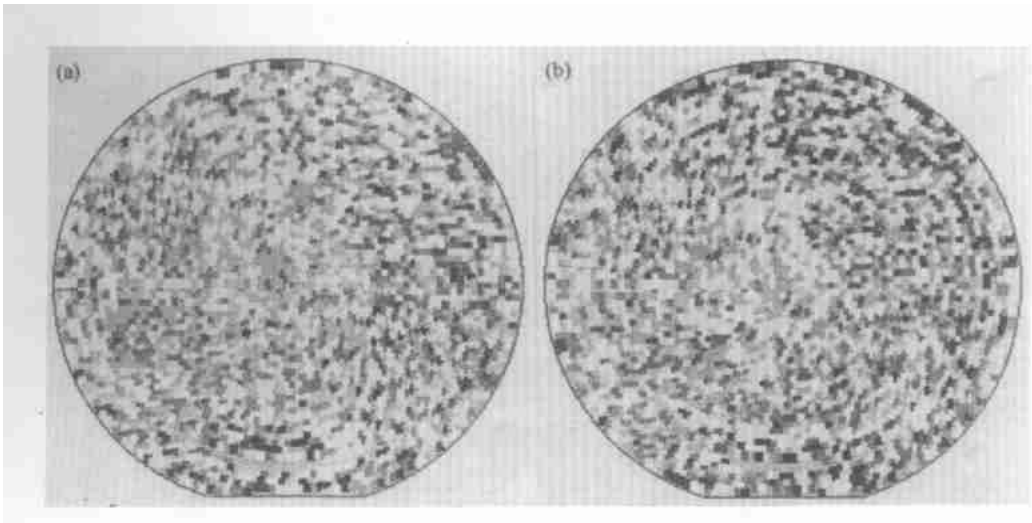


图 3 样品 I 和 II 少子扩散长度 SPV 法 3488 点扫描测量结果分布图

(a) 样品 I; (b) 样品 II.

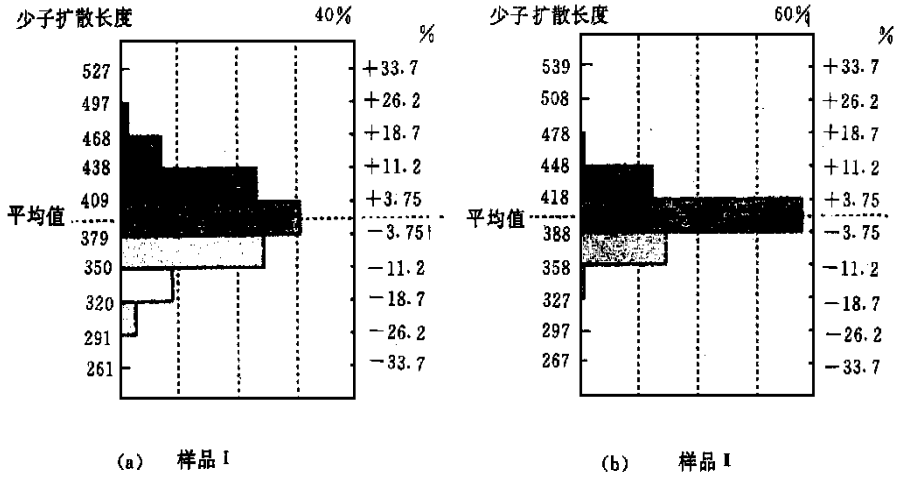


图 4 样品 I 和 II 177 点少子扩散长度扫描测量结果的直方统计图

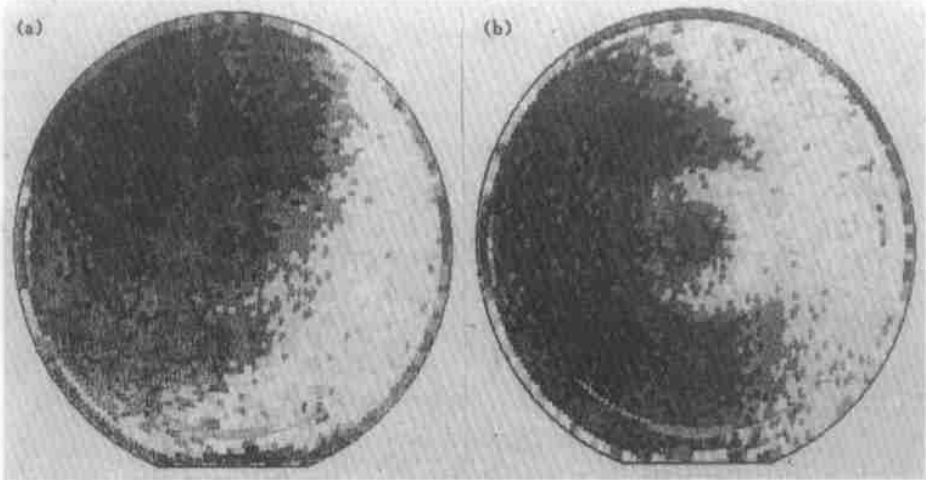


图 5 样品 I 和 II 背表面复合速率分布图

(a) 样品 I; (b) 样品 II.