

# 用红外光弹测量功率整流管 工艺中的残余应力\*

王玉中 赵寿南 黄 岚

(华南理工大学应用物理系, 广东, 广州, 510641)

**摘要** 利用红外光弹系统, 采用森纳蒙特(Senarmont)补偿法, 对功率整流管制备过程中扩散和镀镍工艺所引入的残余应力进行了测量和讨论. 获得扩硼铝、扩磷和镀镍硅片中的应力值, 并给出了残余应力在硅衬底片中的分布图.

**关键词** 整流管, 应力, 硅, 光弹性.

## 引言

在硅器件的制备过程中, 不可避免地会在硅中引入各种残余应力, 它将从多方面影响器件的电学特性<sup>[1]</sup>. 功率整流管在制备过程中往往需要进行高浓度的深结扩散, 这也会在硅中引入较大的残余应力, 迄今为止还未见测量和分析功率整流管制备中残余应力分布的报道. 本文用光弹法测量了其残余应力, 它具有直观、可靠、快速等优点, 并能测量硅片体内的应力分布, 这是 X 射线衍射法、曲率半径法和喇曼光谱等方法所不具备的<sup>[2~5]</sup>.

## 1 测量

### 1.1 样片制备

本实验所用的样片均由广东南海市华南整流器厂提供.

扩硼铝片样片是在电阻率为  $60\sim 70\Omega\cdot\text{cm}$  的 n 型基片上双面扩散制成的. 其剖面示意图如图 1 所示. 硼的表面浓度约为  $5\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ , 结深为  $100\pm 10\mu\text{m}$ . 在硼铝涂层扩散中, 铝的表面浓度比硼低, 但它比硼扩散快, 因此这里的结深是指铝的扩散深度.

双面扩硼铝片去掉一面硼铝扩散层后, 在减薄面重扩磷以形成整流管的  $n^+$  层, 其剖面结构图与图 1 类似. 磷的表面浓度约为  $10^{20}\text{cm}^{-3}$ , 结深为  $35\sim 50\mu\text{m}$ . 样品的厚度减到  $310\mu\text{m}$ .

为了增加焊料的浸润性, 在扩完磷的硅片上镀一层  $3\sim 4\mu\text{m}$  厚的镍. 本实验用的是双面

\* 广东省自然科学基金资助项目

本文 1994 年 10 月 31 日收到, 修改稿 1995 年 7 月 5 日收到

镀镍片,其工作温度为 85~90 C.

本文用的测量样片均为(111)面,实验中从侧面进光观察,取{110}面为观察窗口,<110>方向为观察方向.制作样片时,首先把硅片划成 $0.8 \times 1.0 \text{ cm}^2$ 左右的矩形片,然后对观察窗口仔细研磨、抛光,使它成为平行、平整和光洁无损伤层的表面.

## 1.2 测量分析

红外光弹应力测量系统见文献[2~4].对样片内任意点,在取定 $[\bar{1}\bar{1}2][1\bar{1}0][111]$ 坐标系 $xyz$ 下,一般残余应力 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 都不一定为零.但本文在特殊情况下,某些可为零.

当硅片厚度( $10^{-2} \text{ cm}$ )远小于其最小外形尺寸(1~10cm)的薄矩形片时,它满足弹性薄板理论中的克希霍夫(Kirchhoff, G.)假定,即 $\sigma_z = 0$ <sup>[6]</sup>.在半导体工艺中,样片上无集中力作用,应变微小,同一硅层中各点具有相同的杂质浓度分布.在本文(见图 2 平行于表面的等差线条纹)和以往实际测量<sup>[3~5]</sup>中,证实了样片内部任何一平行表面硅层应力状态相同,近似为二维平面应力, $\tau_{xz}, \tau_{yz}$ 可认为是零.

在取定坐标系统和上述假定下,用红外光弹可以测量出次主应力 $\sigma_x$ (或 $\sigma_y$ ,即 $x$ 方向进光), $\tau_{xy}$ 不产生光效应.但我们用“三向观察法”详细地研究过这类样片主应力 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ <sup>[5]</sup>.可知,在<110>方向观察的任何一平行表面硅层的次主应力,它可以相对表征该层的残余应力.特别对扩散应力,主应力 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 的值近似相等,每点应力状态的应力椭圆近似为圆,说明这样表征有很好精确性.

实验中测出的次主应力表征的残余应力 $\sigma$ 为<sup>[7]</sup>:

$$\sigma = n_A \lambda / Cb, \quad (1)$$

式(1)中 $\lambda$ 是红外辐射的波长( $1.153 \mu\text{m}$ ), $C$ 为相对应力——光性系数,本实验中 $C = 1.59 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ <sup>[5]</sup>, $b$ 为透光方向上的硅片厚度, $n_A$ 为条纹级数.实验发现上述三种样片出现的应力条纹级数小于 1,其小数级次由森纳蒙特补偿法<sup>[7]</sup>是为

$$n_A = \theta / 180^\circ \quad (2)$$

式(2)中 $\theta$ 为补偿角.将式(2)代入式(1)可得

$$\sigma = \lambda \theta / 180^\circ cb, \quad (3)$$

应力的符号可通过钉压法判断<sup>[7]</sup>(正号为张应力,负号为压应力).

## 2 实验结果

由上述 3 种样片的实验观察发现:衬底可近似认为是等应力区,其应力大小见表 1.

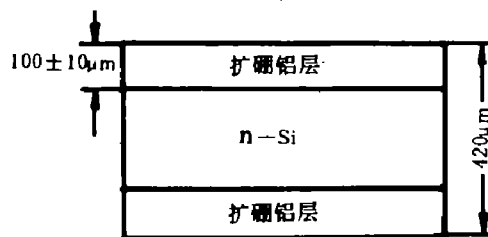


图 1 扩硼铝片

Fig. 1 Boron-diffused aluminium wafer

表 1 硅衬底中残余应力值( $\sigma \times 10^6 \text{N/m}^2$ )  
Table 1 The value of residual stress in Si substrate

片号	扩硼铝片	扩磷片	镀膜片
1	-2.03	-2.01	-6.89
2	-2.19	-2.07	-7.64
3	-2.60	-2.09	-7.94
4	-2.44	-1.92	-7.83
5	-2.26	-2.10	-7.52
平均	-2.30	-2.03	-7.56

2.2 应力分布

图 2 是双面扩散硼铝片经研磨、抛光去掉一面扩散层后用森纳蒙特补偿法拍摄的光弹图照片,其中黑色条纹为零级条纹.根据应力光弹图确定的双面扩散硼铝片去掉一面扩散层和双面镀膜片去掉一面镀膜层的硅衬底应力分布图(对扩硼铝片如图 3 所示).由图可知,在靠近扩散层和镀膜层的硅衬底一侧引入压应力,而在衬底的另一面引入张应力.镀膜层引入的应力较大,它在靠近扩散层的硅衬底中引入  $9.6 \times 10^6 \text{N/m}^2$  的压应力,而硼铝扩散层对应的压应力为  $4.4 \times 10^6 \text{N/m}^2$ .



图 2 单面扩硼铝片的应力光弹图  
Fig. 2 Stress photoelasticity pattern of boron-diffused aluminium sample in one side

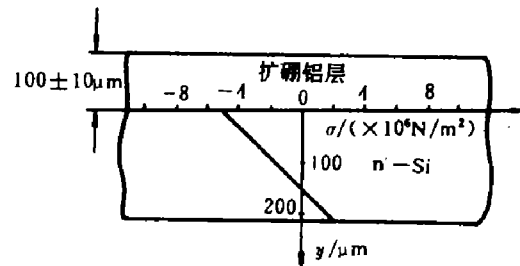


图 3 扩硼铝片硅衬底中残余应力分布  
Fig. 3 Distribution of residual stress in Si for boron-diffused aluminium wafer

3 讨论

对于扩硼铝片由于硼原子半径比硅原子半径小( $r_B = 0.88 \text{ \AA}$ ,  $r_{Si} = 1.17 \text{ \AA}$ ),故在扩散层中引起晶格收缩时,在界面附近扩散层一侧引入张应力,硅衬底一侧引入压应力.铝原子半径虽然比硅原子半径大( $r_{Al} = 1.26 \text{ \AA}$ ),但由于其扩散浓度低,铝的表面浓度约为  $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ,而硼的表面浓度为  $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ,与双杂质源无应力扩散工艺有效杂质浓度相比( $N_B : N_{Al} = 1 : 2.62$ )<sup>[8]</sup>差 3 个数量级,故铝的补偿效应可以忽略,所以界面附近的应力性质主要由硼扩散层决定.对于扩磷片,实验中没有发现有明显的应力梯度,可近似认为是等应力的,原因是由于

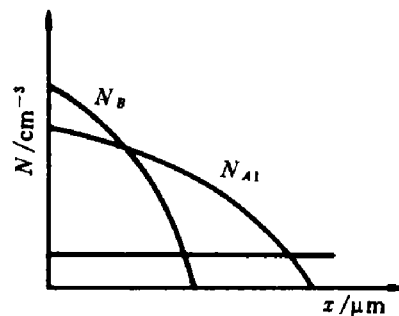


图 4 硼铝涂层扩散硅片内杂质浓度分布  
Fig. 4 The distribution of impurity in boron-aluminium-diffused silicon wafer

硼扩散层和磷扩散层均在界面附近靠近硅衬底一侧引入压应力( $r_p = 1.10 \text{ \AA}$ ), 在另一面引入张应力, 它在硅衬底中的合成应力类似于双面扩散硼铝片. 对镀镍片, 由于镍和硅的热膨胀系数相差较大( $\alpha_s = 2.33 \times 10^{-6} / \text{C}$ ,  $\alpha_{Ni} = 13.3 \times 10^{-6} / \text{C}$ ), 当测量温度(室温)低于淀积温度时, 因镍层收缩较大而硅收缩较小, 从而在镍硅界面附近的硅中引入较大的压应力.

上述实验结果说明: (1) 扩散工艺中引入的应力主要是杂质原子和硅原子半径失配引起的, 硼铝涂层扩散中铝的应力补偿效应很小; (2) 镀镍工艺在硅中引入较大应力, 降低淀积温度可使应力值减小; (3) 在硅器件制备工艺中, 红外光弹法是一种研究硅中引入的应力分布规律的有效手段.

### 参考文献

- 1 庄同曾, 张安康, 黄安芳. 集成电路制造技术——原理和实践, 北京: 电子工业出版社, 1988, 297
- 2 覃甘明, 梁汉成, 赵寿南, 等. 红外研究, 1988, 7(2): 109~112
- 3 黄 岚, 梁汉成, 赵寿南. 红外研究, 1989, 8(3): 203~209
- 4 蒋连生, 赵寿南, 梁汉成. 红外研究, 1990, 9(6): 425~429
- 5 Liang H C, Pan R X, Zhao S N, et al. *J. Appl. Phys.*, 1992, 71(6): 2863~2870
- 6 吴连元. 板壳理论, 上海: 上海交通大学出版社, 1989, 4~5
- 7 天津大学材料力学教研室. 光弹性原理及测试技术, 北京: 科学出版社, 1982, 85~183
- 8 黄 岚, 赵寿南, 祝忠华, 等. 华南理工大学学报, 1994, 22(1): 11~16

## MEASUREMENT OF RESIDUAL STRESS IN SILICON INDUCED BY THE FABRICATION OF POWER RECTIFIER USING INFRARED PHOTOELASTICITY\*

Wang Yuzhong Zhao Shounan Huang Lan

(Department of Applied Physics, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China)

**Abstract** With the help of infrared photoelastic system, the residual stress induced by diffusion and nickelage process in the fabrication of power rectifier was measured and analyzed. The residual stress and stress distribution of diffusing boron-aluminium, diffusing phosphorus and plating nickel in silicon wafer were obtained by using the Senarmont compensation method.

**Key words** rectifier, stress, silicon, photoelasticity.

\* The project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province of China