

硅晶片应力的红外光弹测量*

覃甘明 梁汉成 赵寿南 尹洪辉

(华南工学院物理系)

摘要

对硅晶片进行了四点简支梁模型的加压实验,其应力测量的结果与理论计算的结果基本符合;并测量了某些半导体器件模拟工艺在硅片内引入的应力。

对硅晶片进行了四点

一、引 言

研究硅中应力对深入了解和控制硅材料和器件的性能有着重要意义。红外光弹法是观测硅中应力的重要方法^[1~4],我们已对硅单晶块中应力作了定性和定量的研究^[1,2]。由于半导体器件工艺中使用的硅晶片尺寸非常小,对测量系统、样品制备以及光弹图形的观测提出了新的要求。为此,我们建立了利用红外氦氛激光器作为光源、带有显微放大的红外光弹系统;先后解决了样品制作,条纹级数测定等问题;通过实验检验了系统测量的可靠性。对某些器件模拟工艺中硅片应力作了初步测量和研究。

二、实验原理

根据光弹原理,透明均匀介质在应力作用下发生双折射^[1,2]。在主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 的作用下,相对双折射率为

$$\Delta n = C(\sigma_1 - \sigma_2); \quad (1)$$

式中, C 为材料的相对应力——光性系数。双折射相位差为

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} C d (\sigma_1 - \sigma_2); \quad (2)$$

式中, λ 为光源波长; d 为光通过的介质长度。在平面偏振暗场中,如图1所示(图中 L 表示光束, P 表示起偏轴, A 表示检偏轴),透过光强为

$$I = I_0 \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\alpha}{2}, \quad (3)$$

式中, I_0 为某一常数; θ 为主应力方向与偏振轴的夹角。当双折射相位差 $\alpha = 2n\pi$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 时,发生消光,产生等差线,相应地有 $0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 级条纹;当 $\theta = 0$ 或 90°

本文 1987 年 5 月 8 日收到。

* 中国科学院基金资助课题。

时,也发生消光,而产生等倾线。测出等差线和等倾线,就可以测得 α ,从而得到主应力的方向和大小。

硅晶体对波长大于 $1.1\mu\text{m}$ 的红外辐射是透明的,在应力的作用下同样会发生双折射。由于硅晶格结构各向异性,反映在光弹性质上也存在着各向异性;硅晶体的相对应力——光性系统 C 与光路方向及主应力方向有关^[3,5]。对于分别沿着 $[112]$ 和 $[\bar{1}\bar{1}1]$ 方向的主应力 σ_1 和 σ_2 ,以及沿着 $[1\bar{1}0]$ 方向的光路,对于本实验中的几种应力情况,经实验和计算得出,

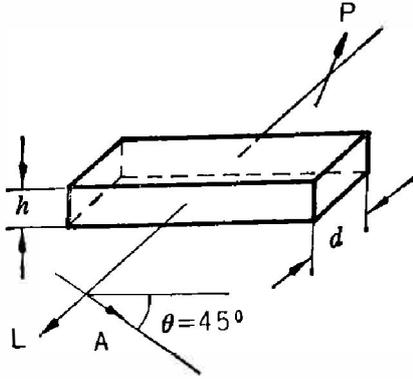


图1 硅薄片应力测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram for measuring stress in a silicon wafer.

σ_2 为零。根据文献[5, 6]计算得出:

$$C = \frac{n_0^3}{2} \left\{ \left[\frac{1}{6} (\pi_{11} - \pi_{12} + 5\pi_{44}) \right]^2 + 4 \left[\frac{\sqrt{2}}{6} (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44}) \right]^2 \right\}^{1/2}; \quad (4)$$

式中, n_0 为无应力时硅的折射率,取 $n_0=3.42$; π_{11} 、 π_{12} 和 π_{44} 是 $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 坐标系下表征应力弹光系数矩阵中的元素,采用 Higginbotham^[7]的数值,得到:

$$C = 1.59 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{N}. \quad (5)$$

当主应力差为 $10^3 \text{N}/\text{cm}^2$ 数量级时,相对双折射率 Δn 为 10^{-4} 数量级。

三、实验及讨论

由于硅晶片很薄,从正面测量有困难,所以采取从侧面测量的方法,以增加双折射相位差。在样品制备中,采取机械化学抛光方法对观测窗口进行精细抛光以减小光的散射。使用波长为 $1.15\mu\text{m}$,功率为 1.5mW 的氦氖激光光源,由于此波长激光可以透过硅,具有单色性好、光强集中、双折射效果好等优点,使观测灵敏度提高了;同时,此波长激光又可被 $1.2\mu\text{m}$ 截止的红外变像装置转换成可见光,因此,可方便地进行光弹图形的观察。

1. 四点简支梁模型的硅晶片应力

四点简支梁模型如图2所示。它具有简单的理论解。根据材料力学,简支梁中部的主应力为

$$\sigma_1(y) = -\frac{12Fa}{dh^3} y, \quad (6)$$

$$\sigma_2 = 0, \quad (7)$$

式中, d 是梁宽(在 $[1\bar{1}0]$ 方向), $y=0$ 为中性轴,在梁的 $\overline{OO'}$ 线上。本实验中, $d=10\text{mm}$, $a=0.90\text{mm}$, $h=450\mu\text{m}$ 。在平面偏振暗场中,当偏振轴与 $[112]$ 、 $[\bar{1}\bar{1}1]$ 方向成 45° 时,随着外力 F 的增加,等差线数目也增加,如图3所示。实验发现,外力引起的等差线是平行、等距分布的,位于中间的一条等差线不随外力的变化而改变位置,显然是零级条纹;下面部分受张力作用,等差线是正级数条纹;上面部分受压力作用,等差线是负级数条纹。当偏振轴分别与 $[112]$ 和 $[\bar{1}\bar{1}1]$ 同方向时全部消光,说明主应力在 $[112]$ 和 $[\bar{1}\bar{1}1]$ 方向上。实验和计算表明, $[\bar{1}\bar{1}1]$ 方向的主应力 σ_2 不仅在自由表面上等于零,而且在内部处处都等于零,并且 σ_1 是线性分布的。当 $F=1.175\text{kg}$ 时,由式(6)求出样品表面最大应力 $(\sigma_1)_{\text{max}}=3.1 \times 10^3 \text{N}/\text{cm}^2$,而由相应的光弹图形看到样品表面条纹级数达4级,即 $\alpha=8\pi$,由式(2)得到 $(\sigma_1)_{\text{max}} =$

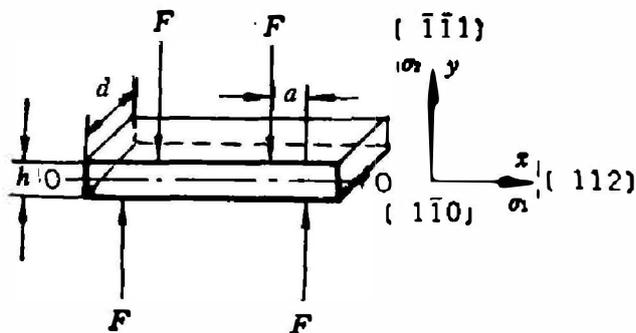


图2 四点简支梁模型

Fig. 2 Model of simply supported beam subjected to four concentration forces.

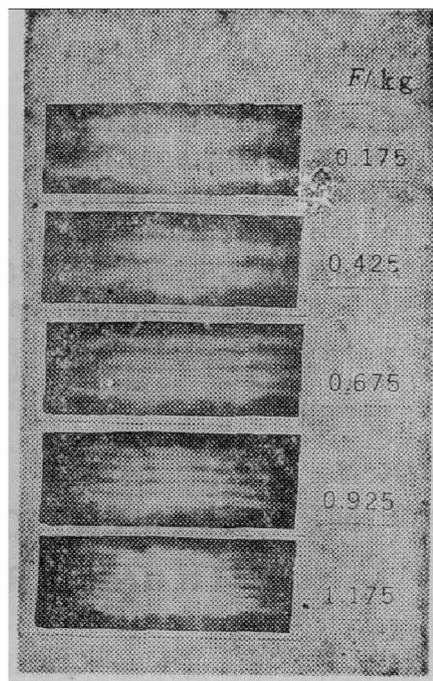


图3 四点简支梁模型的硅应力光弹图形

Fig. 3 Stress photoelastic patterns of silicon wafer with a model of simply supported beam subjected to four concentration forces.

$2.9 \times 10^3 \text{N/cm}^2$ 。以上讨论表明, 红外光弹测量结果与理论结果基本符合。

2. 器件工艺中的应用

(1) 模拟封装工艺。把{111}晶面的硅片解理、抛光成尺寸为 $7 \times 8 \times 0.45 \text{mm}^3$ 的样品, 在 140°C 下, 用环氧树脂把样品粘结在 $300\mu\text{m}$ 厚的铜片上。由于铜和硅的热膨胀系数不同 ($\gamma_{\text{Cu}} = 14.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\gamma_{\text{Si}} = 2.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), 冷却后, 硅片中将产生应力。对粘结后的样品加热, 观测到, 当温度从室温逐渐升高时, 等差线数目逐渐减少, 温度达 140°C 时, 全部消光, 应力为零, 硅片和铜片处于应力松弛状态。根据条纹变化, 可判断室温时各条纹级数 (见图4)。最大条纹级数达3级, 即 $\alpha = 6\pi$, 由式(2)得出 $(\sigma_1)_{\text{max}} = 3.1 \times 10^3 \text{N/cm}^2$ 。实验得出 $\sigma_2 = 0$ 。

用同样方法把硅片粘结在柯伐片上, 由于柯伐合金的热膨胀系数 ($\gamma_{\text{Kovar}} = 5.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) 比铜小, 所以产生的应力也小, 实验得出 $(\sigma_1)_{\text{max}} = 1.4 \times 10^3 \text{N/cm}^2$ 。

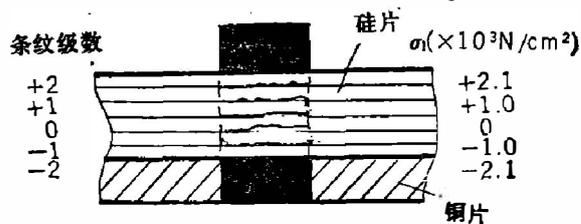


图4 封装后硅片中的应力

Fig. 4 Stress in a silicon wafer after packing.

(2) 模拟铝蒸发合金工艺。把{111}晶面、尺寸为 $10 \times 10 \times 0.45 \text{mm}^3$ 的硅样片放入真空镀膜机中冷蒸一层 $1\mu\text{m}$ 厚的铝膜, 未观察到应力产生; 然后在 520°C 下合金15分钟, 观测发现硅片中产生应力, 等差线是小数级条纹。主应力 σ_1 最大值估算为 $1.0 \times 10^2 \sim 3.0 \times 10^2 \text{N/cm}^2$, 而 $\sigma_2 = 0$ 。

参 考 文 献

- [1] 赵寿南等, 华南工学院学报, **9**(1981), 4:121.
- [2] 赵寿南等, 红外研究, **6**(1987), 1:45.
- [3] Kotake H. and Takasu Shin., *J. Electrochem Soc.*, **127**(1980), 179.
- [4] DeNicola R. O. and Tauber R. N., *J. Appl. Phys.*, **42**(1971), 4262.
- [5] 蒋民华, 晶体物理, 山东科学技术出版社, 1980.
- [6] 周佐平、章小民, 红外研究, **6**(1987), 6:437~443.
- [7] Higginbotham C. W. et al., *Phys. Rev.*, **184**(1969), 821.

MEASUREMENT OF STRESSES IN SILICON WAFER WITH INFRARED PHOTOELASTIC METHOD

QIN GANMING, LIANG HANCHENG,

ZHAO SHOUNAN, YIN HONGHUI

(Department of Physics, South China Institute of Technology)

ABSTRACT

An infrared photoelastic system for measuring stresses in silicon wafers and its measurement method are presented in this paper. The experiment of exerting pressure on a silicon wafer is made on a model of simply supported beam subjected to four concentration forces. The result of stress measurement basically accords with that based on the theory. And stresses induced in silicon wafers during the simulated processing of semiconductor devices are measured.