

# 硅晶片氧化应力的红外光弹性 测量及研究\*

黄 岚 梁汉成 赵寿南

(华南理工大学物理系, 广东, 广州)

**摘要**——本文利用红外激光光弹性仪, 采用光测弹性力学中的Senarmont 补偿法, 解决了硅晶片小数级条纹值定量测量问题. 在考虑硅晶体光弹性效应各向异性的基础上, 实测了(111)、(100)单晶硅片的原始应力及氧化应力. 对硅晶片原始应力的产生与消除、氧化应力在硅中的分布、氧化应力与氧化层厚度的关系、氧化应力随时间的变化等进行了研究.

**关键词**——硅, 氧化, 应力, 光弹性.

## 1. 序 言

把红外光弹性法用于测量硅单晶应力早在五十年代就开始了<sup>[1]</sup>. 1977年, Takasu 等<sup>[2]</sup>又进一步利用红外光弹性法分析硅器件切、磨、抛、氧化、封装等工艺中的应力和应变. 1980年, 他们又在考虑硅晶体光弹性效应各向异性的基础上, 测量了模拟封装工艺中的应力及应力随温度的变化<sup>[3]</sup>. 我们也建立了用红外氦氛激光器作为光源的硅单晶应力测试系统, 对硅片中的应力进行了初步观察和研究<sup>[4]</sup>. 以上的工作都着重于对硅片应力的定性观察和整级数条纹的定量测量. 而硅器件工艺中产生的应力大多在  $10^1 \sim 10^3 \text{ N/cm}^2$ , 一般属小数级条纹范围. 本文首次采用光测弹性力学中的 Senarmont 补偿法<sup>[5]</sup>, 解决了二维应力情况下硅片应力的小数级条纹值测量问题, 为精确定量检测硅器件工艺过程中的应力奠定了基础.

本文还采用上述方法, 测量了硅片氧化前后的原始应力及氧化应力, 并对结果进行了分析和讨论.

## 2. 小数级应力条纹的测量

图 1 是测量装置示意图; 其中, IS 表示红外氦氛激光器 ( $\lambda = 1.153 \mu\text{m}$ ); P、A 分别为红外起偏振镜和检偏振镜; M 为样片; Q 为 1/4 波片; IM 为红外变像管; O 为照相机. 采用激光器作光源可大大提高小数级条纹的测量精度.

本文 1988 年 6 月 11 日收到.

\* 国家自然科学基金资助课题.

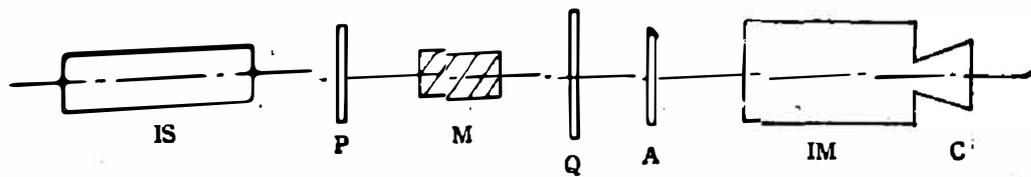


图 1 红外激光光弹性仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of infrared laser photoelasticity system.

## 2.1 样片的制备

由于硅晶片很薄,为了增大双折射光程差,光线从侧面入射并平行于硅片表面,具体的入射方向(观察方向)可依实际情况而定. 本实验用电阻率大于  $2\Omega\cdot\text{cm}$ , 厚度为  $250\sim 500\mu\text{m}$  的(111)、(100)晶面直拉单晶硅片,解理划片成为  $0.8\times 1.2\text{cm}^2$  的矩形样片,划片方位及观察方向如图 2 所示.为了使硅片均匀透光,采用  $\text{SiO}_2$  胶体抛光液对两个(110)面观察窗口精细抛光,使窗口成为平行、平整、光洁没有损伤层的表面. 抛光后的硅片在红外光弹性仪下观察透光均匀,在硅片某处稍加应力,即出现清晰的干涉条纹. 以这种硅片作为应力测量样品,可进行研磨、抛光、氧化等应力的观测.

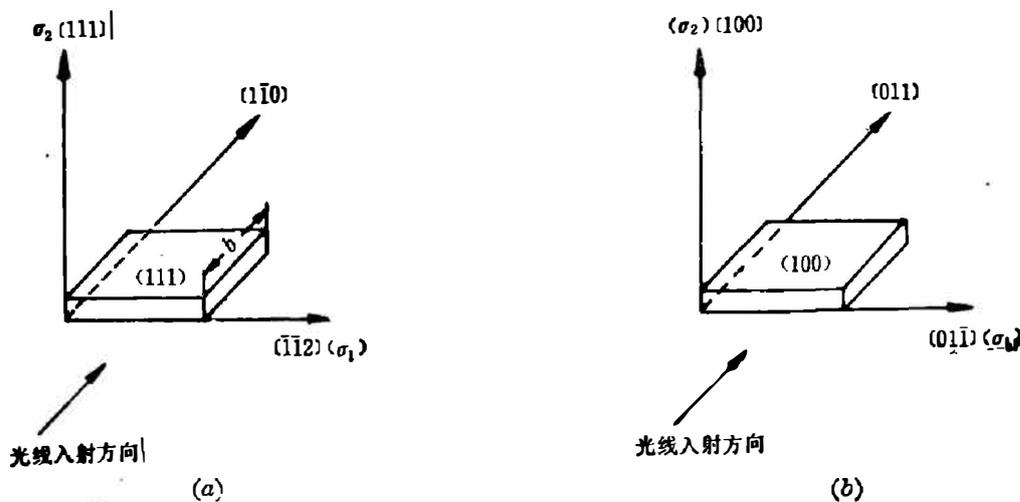


图 2 划片方位

Fig. 2 Scribing orientation.

## 2.2 样品应力方向的确定

利用图 1 所示的装置,在平面偏振暗场下,同步转动起偏镜和检偏镜,观察氧化前后的样品. 当样品表面与偏振轴不平行时,可观察到上述样品内有应力分布. 图 3(a). 是氧化样品内的应力光弹图,说明样品内有氧化层的区域(即照片中的亮区)存在应力. 当样品表面与偏振轴平行时,除氧化片的氧化层边缘部分外,所观察区域均出现等倾线,表明样品的主应力方向与样品表面平行或垂直. 图 3(b). 表示在氧化样品氧化层边缘,应力分布较复杂,而在其它区域,均出现消光(等倾线). 由弹性力学的二维应力理论<sup>[5]</sup>可以证明:垂直于样品表面的主应力为零. 因此,对(111)晶面样品,在 $\langle 112 \rangle$ 方向的主应力不为零;对(100)晶面样品, $\langle 110 \rangle$ 方向的主应力不为零(见图 2),它们都可用光弹性法测定.

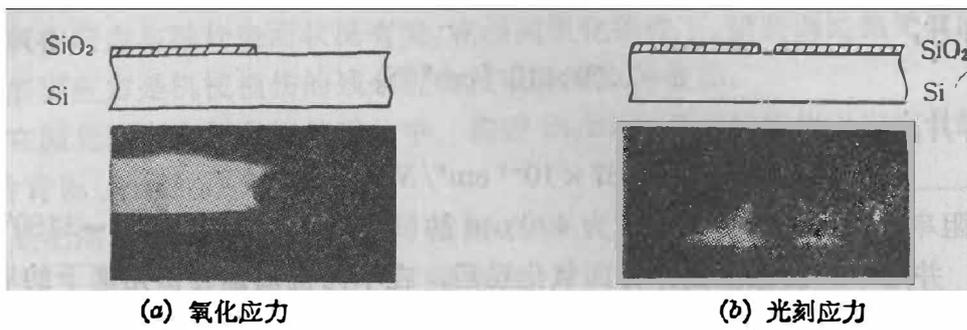


图 3 氧化样片应力光弹图

Fig. 3 Stress photoelasticity pattern in oxidized sample.

### 2.3 小数级条纹及应力测量

用光测弹性力学中的 Senarmont 法<sup>[6]</sup>测量小数级条纹时,使起偏镜与检偏镜垂直,并与样片的主应力方向(表面)呈  $45^\circ$ ,  $1/4$  波片的快慢轴与偏振轴平行;转动检偏镜,应力条纹发生移动.选定一被测点  $A$ ,当  $A$  点附近的第  $n$  级整数条纹移动到  $A$  点时,对应的检偏镜读数为  $\theta$ ,则  $A$  的应力条纹级数为

$$n_A = n + \frac{\theta}{180^\circ}; \quad (1)$$

该点的主应力为

$$\sigma_A = \frac{\lambda n_A}{cb} \quad (2)$$

当  $n_A < 1$  时,

$$\sigma_A = \frac{\lambda \theta}{180^\circ cb}; \quad (3)$$

其中,  $\lambda$  为光源的波长;  $b$  为光线入射方向样片的宽度;  $c$  为相对应应力-光性系数,它与样片的主应力方向及观察方向有关.我们以前的实验<sup>[4,6]</sup>与文献 [7] 由实验测出的应力弹光系数计算相对应应力-光性系数符合较好.文献 [6] 给出了几种常见晶向的相对应应力光性系数表达式,将 Higginbotham<sup>[7]</sup> 的数值代入  $c$  的表达式<sup>[6]</sup>得:

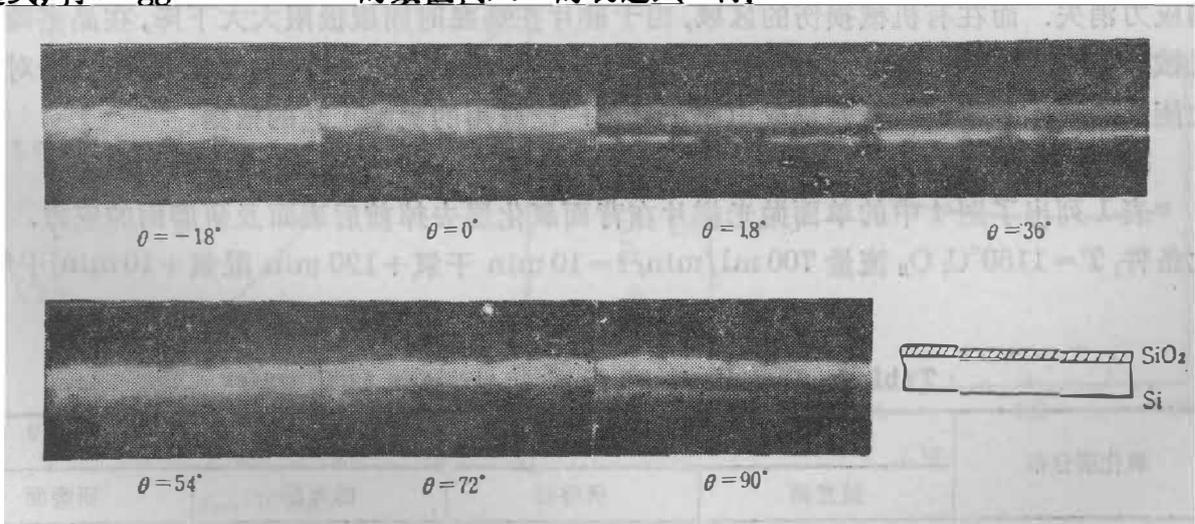


图 4 氧化应力在不同检偏镜补偿角度下的应力光弹图

Fig. 4 Stress photoelasticity pattern at different compensation angles of analyzer in oxidized silicon wafer.

对(111)晶面样片,

$$c = 1.59 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{N}; \quad (4)$$

对(100)晶面样片,

$$c = 1.87 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{N}. \quad (5)$$

图 4 是电阻率为  $8 \sim 12 \Omega \cdot \text{cm}$ , 厚度为  $420 \mu\text{m}$  的(100)单面抛光片在  $T = 1180^\circ\text{C}$  下, 经  $120 \text{ min}$  氧化, 并用 HF 腐蚀液去掉背面氧化层后, 在不同检偏镜补偿角度下的应力光弹图. 把该氧化层逐层腐蚀后, 各点应力线性下降, 说明氧化样片的应力条纹级数小于 1. 因此, 硅片中每条黑色条纹处对应的应力可通过相应的检偏镜读数由式(3)直接求出.

### 3. 氧化应力

#### 3.1. 氧化前单晶片的原始应力

对双面抛光、单面抛光、双面研磨的单晶样片进行原始应力测试, 发现单面抛光、双面研磨的硅片内有应力分布. 用  $\text{SiO}_2$  抛光液把研磨面分步抛光到镜面, 发现应力线性下降直到消失, 说明应力条纹级数小于 1, 应力大小可由式(3)决定. 对电阻率为  $7 \sim 15 \Omega \cdot \text{cm}$ , 厚为  $360 \mu\text{m}$  的(111)面 P-Si 单面抛光片, 在研磨面应力达最大, 为  $9.0 \times 10^3 \text{ N/cm}^2$ ; 抛光面应力是  $5.0 \times 10^3 \text{ N/cm}^2$ . 对电阻率为  $30 \sim 50 \Omega \cdot \text{cm}$ , 厚为  $360 \mu\text{m}$  的(111)面 P-Si 双面研磨片, 应力在中间区域达最小, 两研磨面达最大, 均为  $6.8 \times 10^3 \text{ N/cm}^2$ . 这类样片由于应力在两个表面的垂直方向呈对称分布, 不发生弯曲, 不可能采用 X 射线衍射法和光学方法(由曲率半径决定应力)测量应力. 显示了红外光弹性法在测量无弯曲硅片应力方面的优越性.

把上述单面抛光与双面研磨样片在氮气氛下分别在  $1180^\circ\text{C}$ 、 $800^\circ\text{C}$  下退火  $20 \text{ min}$ 、 $30 \text{ min}$ , 发现应力下降到  $6.7 \times 10^1 \text{ N/cm}^2$  以下, 而且集中在有机械损伤的区域, 在远离损伤层的区域基本无应力. 本文认为, 机械损伤产生的应力来源于研磨面的机械损伤层(约  $10 \mu\text{m}$ ), 在高温处理时, 晶格原子动能增加, 可以克服应变能而重新回到其平衡位置, 使硅片的应力消失. 而在有机械损伤的区域, 由于硅片在高温时屈服极限大大下降, 在晶格畸变的机械损伤层附近产生缺陷, 出现残余应力. 由于残余应力区远离硅片抛光表面, 不会对器件性能产生较大影响. 这就是集成电路工艺中广泛应用的吸除工艺的依据.

#### 3.2. 氧化应力

表 1 列出了图 4 中的单面抛光样片在背面氧化层去掉前后表面及研磨面的应力. 其氧化条件:  $T = 1180^\circ\text{C}$ ;  $\text{O}_2$  流量  $700 \text{ ml/min}$ ;  $t = 10 \text{ min}$  干氧 +  $120 \text{ min}$  湿氧 +  $10 \text{ min}$  干氧.

表 1 (100)晶面氧化应力分布  
Table 1 Distribution of oxidic stress in (100) wafer

氧化层分布	双面有氧化层		抛光面有氧化层	
	抛光面	研磨面	抛光面	研磨面
最大应力 ( $\text{N/cm}^2$ )	$2.2 \times 10^3$	$2.9 \times 10^3$	$3.3 \times 10^3$	$-6.5 \times 10^1$

分析表 1 及图 4 可知:

(1) 氧化应力与硅片表面状况有关, 在相同氧化条件下, 研磨面比抛光面的应力大. 这是由于研磨面应力是机械损伤的残余应力及氧化应力的叠加.

(2) 在抛光面存在氧化层的硅片中, 靠近 Si/SiO<sub>2</sub> 界面的氧化应力达最大, 且属张应力; 而硅片背面(无氧化层)是压应力.

图 5 是把图 4 的样片经氢氟酸腐蚀液在 30°C 的室温下腐蚀后得出的氧化应力随氧化层厚度下降的实验曲线. 图 6 是将(111)面 P-Si 单面抛光片(电阻率为 7~15 Ω·cm, 厚度为 360 μm) 在 1150°C, 氧气流量为 700 ml/min 下分别进行 20 min、30 min、60 min、90 min、150 min 的湿氧化, 在其前后都有 10 min 干氧化, 通过实验测出的氧化应力与氧化层厚度的关系曲线.

图 5 及图 6 皆表明氧化应力正比于氧化层厚度, 这与弹性形变为基础的双金属理论一致<sup>[8]</sup>, 说明晶体内弹性形变占优势.

把氧化样片在高温下退火, 未发现氧化应力在退火前后有明显变化. 但把氧化样片在室温下放置一段时间后, 却发现氧化应力随放置时间延长而减小. 图 7 为图 6 中进行了 150 min 氧化后的样片氧化应力随时间变化而释放的实验曲线.

对经长时间应力释放的样片观测表明: 样片内部产生许多分布均匀的微小应力区, 但其方向不规则, 在原来可以消光的区域出现一定的平均亮度; 而且应力释放越多, 此现象越明显. Echardt<sup>[9]</sup> 曾指出, 光弹图形的平均亮度与位错坑密度有良好的对应关系. 因此, 本

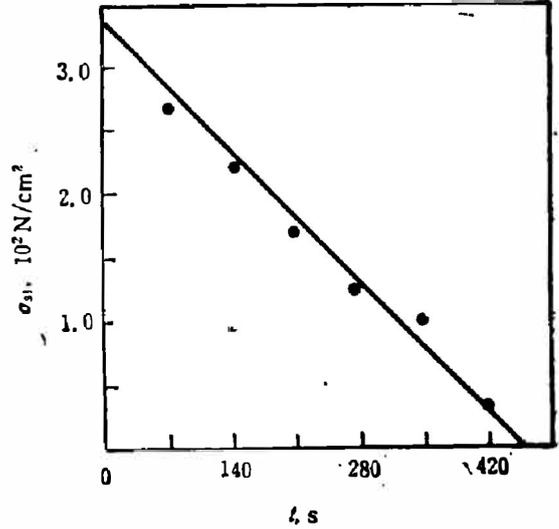


图 5 氧化应力随 SiO<sub>2</sub> 层腐蚀时间的变化  
Fig. 5 Variation of oxidic stress with etching time of SiO<sub>2</sub>.

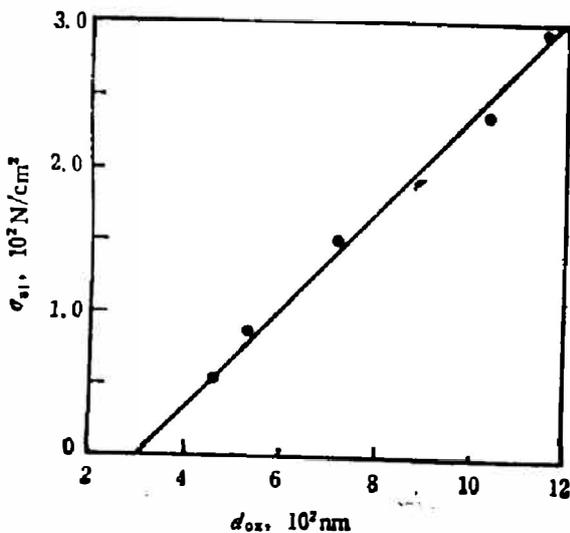


图 6 氧化应力随氧化层厚度的变化  
Fig. 6 Variation of oxidic stress with oxidic film thickness.

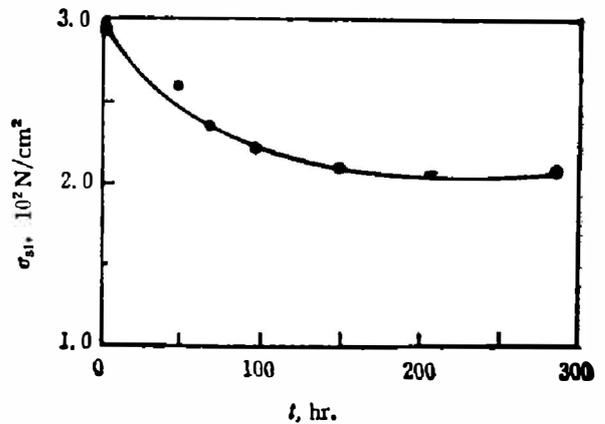


图 7 氧化应力随时间的释放  
Fig. 7 Relaxation of oxidic stress as a function of time.

文认为具有应变的硅片,晶格处于一种不稳定的高能状态,有回到其平衡位置的趋势,晶体中应力能与晶体缺陷和表面的相互作用而部分释放。本实验初步表明应力释放与缺陷的存在有关,但这涉及到应力和晶体缺陷的相互作用,其机理还有待进一步研究。

#### 4. 结 束 语

(1) 本文采用红外激光光弹仪,利用 Senarmont 补偿法成功地检测了硅晶片高温氧化工艺产生的氧化应力。该方法在直观地检测硅片内的应力分布,决定无弯曲硅片的应力方面显示出比通过测量曲率半径决定应力的 X 射线衍射法、光学方法优越。

(2) 氧化前硅片研磨面的机械损伤可在硅中引入应力,通过抛光研磨面、高温热处理等方法可基本消除机械损伤应力。

(3) 硅片中的氧化应力使硅片弯曲,在靠近 Si/SiO<sub>2</sub> 界面应力达最大。在热氧化过程中,氧化应力主要使硅片产生弹性形变。由于氧化应力和缺陷有相互作用,而缺陷对器件性能有严重影响,因此,可以肯定氧化应力对器件性能产生不良影响。但应力与晶体缺陷的相互作用,其机理还待进一步研究。

#### 参 考 文 献

- [1] Bond W. L. and Andrus Z., *Phys. Rev.*, **101**(1956), 3: 1211.
- [2] Takasu S. et al., in *Semiconductor Silicon 1977*, The Electrochem. Soc. Inc., Princeton, 1977, 456.
- [3] Kotake H. and Takasu S., *J. Electrochem. Soc.*, **127** (1980), 1: 179.
- [4] 覃甘明、梁汉成、赵寿南、尹洪辉, *红外研究*, **7**(1988), 2: 109~112.
- [5] 天津大学材料力学教研室光弹组编, *光弹性原理及测试技术*, 北京:北京科学出版社, 1982, P35, 115.
- [6] 周佐平、章小民, *红外研究*, **6**(1987), 6: 437~443.
- [7] Higginbotham G. W. et al., *Phys. Rev.*, **184** (1969), 3: 821.
- [8] Brotherton S. D. et al., *Solid State Electronics*, **16** (1973), 12: 1367.
- [9] Eckhardt G. and Lederhandler S. R., *Solid State Design*, **3**(1962), 5: 27.

## MEASUREMENT AND STUDY OF STRESS IN OXIDIZED SILICON WAFER BY INFRARED PHOTOELASTIC METHOD\*

HUANG LAN LIANG HANCHENG ZHAO SHOUNAN

*(Department of Physics, the South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong, China)*

### ABSTRACT

Fractional order fringes of stress in silicon wafer are measured by Senarmont compensation of photoelasticity with the help of infrared laser photoelasticity system. Taking account of photoelastic anisotropy of silicon crystal, the original stress and oxidic stress in (111), (100) silicon wafers are quantitatively determined. The production and elimination of the original stress, the distribution of the oxidic stress, the relationship between the oxidic stress and the thickness of oxide film, the variation of the oxidic stress with time in silicon wafer, etc. are studied.

---

\* Project supported by the Fund of the Natural Sciences of China.