

硅晶体中离子注入应力的红外 光弹性测量及研究*

蒋连生 赵寿南 梁汉成

(华南理工大学物理系, 广东, 广州, 510641)

摘要——根据光弹性原理, 利用红外光弹性测量系统, 采用 Senarmont 补偿法, 对离子注入工艺应力进行了测量. 对离子注入工艺应力、退火后应力、应力的分布、应力随剂量和表面浓度的变化进行了研究.

关键词——硅, 离子注入, 应力, 光弹性.

1. 引 言

1956年, Bond 等人^[1]用红外光弹性法定性地研究了硅晶体中应力. 1959年, Lederhandler^[2]用红外光弹性法定量地测量了硅晶体中应力的大小. 而硅薄片中应力的定量测量则是在1977年由 Takasu 等^[3]开始的, 他们建立了测量硅单晶片应力的定量测量系统. Chambonnet 等^[4]于1986年采用计算机辅助红外光弹性测量法测量硅多晶中的应力. 梁汉成等^[5]于1987年利用图象处理系统并与计算机相结合, 建立了自动采集处理数据的硅单晶应力测量系统. 本文在上述研究的基础上, 根据工程上光弹性测量原理, 利用红外光弹性测量系统, 采用 Senarmont 补偿法^[6], 对离子注入工艺应力进行了测量及研究. 离子注入是集成电路的关键工艺, 认识和控制离子注入工艺应力, 对提高集成电路的集成度和性能是很有意义的.

2. 测量系统及样品制备

2.1 测量系统

图1是硅薄片应力的红外激光光弹性测量系统示意图. 其中 IS 表示红外氦氖激光管 (波长 $\lambda = 1.153 \mu\text{m}$), P、A 分别为红外起偏镜和检偏镜, M 为样品, Q 为 1/4 波片, IM 为红外变像管, CA 为照相机, F、S 为 1/4 波片的快、慢轴.

2.2 样品制备

本文1989年12月12日收到, 修改稿1990年6月10日收到.

* 国家自然科学基金资助课题.

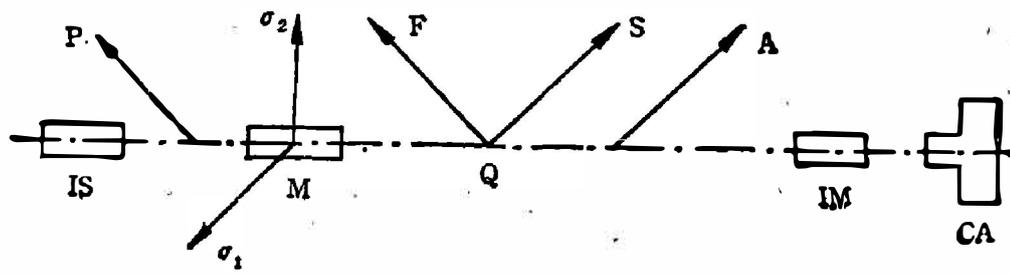


图 1 红外激光光弹性测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of infrared laser photoelasticity measurement system.

实验用电阻率为 $10\sim 12.5\ \Omega\text{-cm}$, 片厚约为 $400\ \mu\text{m}$ 的(111)晶面的 P 型硅片. 注入工艺是: 注入磷离子, 注入能量为 $100\ \text{keV}$, 注入剂量为 $1\sim 5\times 10^{18}\ \text{cm}^{-2}$, 束流为 $120\ \mu\text{A}$, 真空度为 $6.7\times 10^{-4}\ \text{Pa}$, 硅片注入及冷却均在室温下进行.

对于(111)面的硅单晶片, 取(110)面为观察窗口, 以 $\langle 110 \rangle$ 为观察方向. 用金刚刀将硅片解理划成 $0.8\times 1.0\ \text{cm}^2$ 的矩形片, 然后对要观察窗口研磨和抛光, 使其成为平行、平整、光亮、无损伤的表面.

3. 离子注入应力

3.1 离子注入应力性质及大小的确定

在平面偏振光的暗场下观察单面磷离子注入样品, 发现当样品表面与偏振轴平行或垂直时, 全场消光, 说明样品的次主应力方向与样品表面平行或垂直, 并且可证明^[7], 没有垂直于样品表面方向的应力, 只有平行于样品表面的应力, 即 $\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_2 = 0$, 如图 2 所示.

本实验中, 采用钉压法^[6]判定次主应力的性质. 通过实验测试, 靠近注入面的硅衬底一侧受压应力, 背面受张应力. 同时发现在暗场下只出现等差线分数级条纹, 因此, 磷离子注入在硅衬底中引起的应力条纹级次不足一级. 采用光测弹性力学中的 Senarmont 补偿法测量分数级条纹, 补偿后可求出应力的大小为

$$\sigma = \frac{\lambda\theta}{180^\circ \cdot C \cdot d}, \quad (1)$$

式(1)中 $\lambda = 1.153\ \mu\text{m}$, θ 为补偿角度, C 为相对应应力—光性系数, 本实验中取 $C = 1.59 \times 10^{-12}\ \text{cm}^2/\text{dyn}^{[7]}$, d 为透光厚度(约 $0.8\ \text{cm}$).

3.2 离子注入应力

对单面磷离子注入剂量为 $3 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-2}$ 的样品退火后硅衬底中的应力情况进行了研究, 发现应力在硅衬底中沿 y 方向的分布是线性的, 如图 3 所示.

用四探针方法对单面磷离子注入硅片的表面浓度进行了测量, 测试结果如图 4 所示. 其中应力为退火后的最大压应力. 离子注入后磷离子处于间隙位置, 需要进行退火才进入替位位置以实现电激活, 才可测得表面浓度(这里忽略了退火对结深的影响). 由图 4 可知, 最大

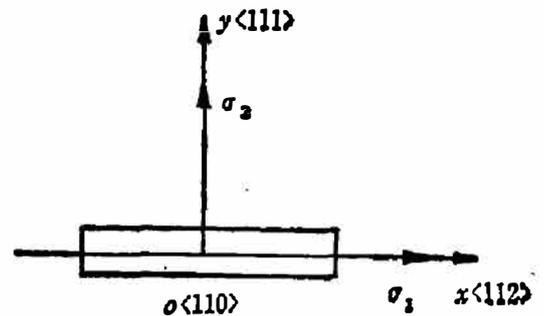


图 2 样品的次主应力方向

Fig. 2 Sub-principal stress orientation of the sample.

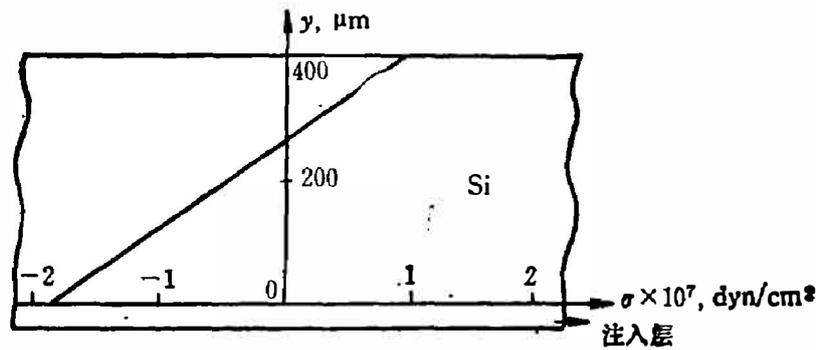


图3 应力在硅衬底中的分布

Fig. 3 The distribution of stress in ion-implanted silicon wafer.

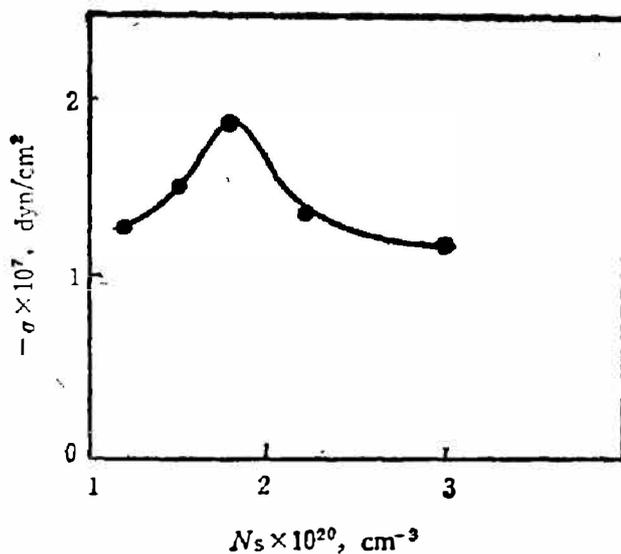


图4 应力随表面杂质浓度的变化

Fig. 4 Variation of the stress with surface impurity concentration.

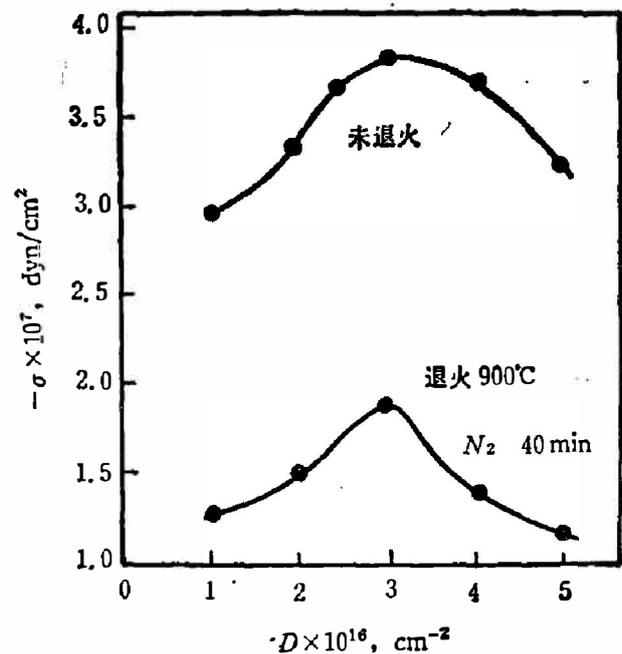


图5 应力随剂量的变化

Fig. 5 Variation of the stress with implanting dose.

压应力与表面杂质浓度是非线性关系。由于磷离子注入剂量比较大,注入能量比较高,引起的晶格损伤相当厉害,这样必然产生应力。即使经过高温退火,晶体的晶格结构得到了一定恢复,但是,还没有恢复到完整的结构,加上磷与硅的原子半径的差异,所以退火后还存在应力。

在实验中,分别测试了未退火和退火后磷离子注入应力,发现未退火的最大压应力比退火后的最大压应力大,测试结果如图5所示。不论是退火还是未退火,当最大压应力在 $1 \sim 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 剂量内时,其应力随剂量增加而有所增大;而最大压应力在 $3 \sim 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 剂量内时,其应力随剂量增加反而减小。

对于图4、5的定性说明,可以采用 Takano 等人^[8]对高浓度磷扩散(结深为 $30 \mu\text{m}$)研究得出的应力与表面浓度的关系。他们得出,如果表面浓度小于 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 时,由于掺磷杂质后,扩散层晶格收缩(磷原子半径较硅小),硅衬底中靠近扩散层一侧产生压应力;若表面浓度大于 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 时,由于过饱和的磷原子位于间隙位置,使扩散层晶格膨胀,故靠近扩散层的硅衬底一侧就产生张应力。在这转变中有一过渡过程,起初,由于磷原子增加,使扩散层

晶格收缩,当晶格收缩到最小时,随着磷原子的再增加,晶格就由收缩最小开始使晶格有所膨胀,这时衬底的压应力就逐渐减小。

通过计算可得,注入结深以及浓度峰值与剂量的关系如图6所示。由图6可知,注入结深相对上述扩散的结深很浅(注入结深小于 $0.5\mu\text{m}$),注入浓度相对扩散浓度大一个数量级(注入浓度在 10^{21}cm^{-3} 数量级),所以应力的变化与扩散情况不尽相同,在离子注入剂量为 $3\times 10^{16}\text{cm}^{-2}$ 时,注入层晶格收缩到最小,也就是靠近注入层硅衬底一侧的压应力最大。剂量在 $1\sim 3\times 10^{16}\text{cm}^{-2}$ 增大过程中(即磷原子增加),注入层晶格逐渐收缩到最小;当注入剂量由 $3\times 10^{16}\text{cm}^{-2}$ 再增大时,注入层晶格就开始有所膨胀,到 $5\times 10^{16}\text{cm}^{-2}$ 时,注入层晶格还没有恢复到原始晶格,所以,剂量在 $3\sim 5\times 10^{16}\text{cm}^{-2}$ 增大过程中,衬底中的应力逐渐有所减小。其中注入剂量的转换值 $3\times 10^{16}\text{cm}^{-2}$ 以及应力的大小是由我们的具体工艺条件所决定的。

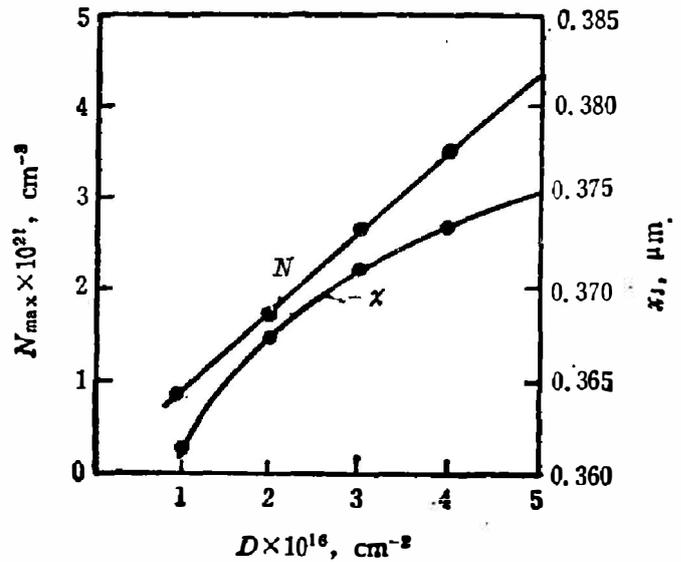


图6 注入结深和浓度峰值与剂量的关系
Fig. 6 The relationships of implanted junction depth and concentration with the dose

4. 结 束 语

本文利用红外光弹测量系统,采用 Senarmont 补偿法,首次成功地对离子注入应力进行了研究,结果表明:

- (1) 靠近磷离子注入层一侧的硅衬底存在压应力,背面是张应力。
- (2) 磷离子注入应力,在 $1\sim 3\times 10^{16}\text{cm}^{-2}$ 剂量内,应力随剂量增加而增大;在 $3\sim 5\times 10^{16}\text{cm}^{-2}$ 剂量内,应力随剂量增加反而减小。

(3) 离子注入应力在 900°C 退火40 min后有所减小。退火后,离子注入应力与表面浓度呈非线性关系。

参 考 文 献

- [1] Bond W. L. and Andrus Z., *Phys. Rev.*, **101** (1956), 3: 1211.
- [2] Lederhandler S. R., *J. Appl. Phys.*, **30** (1959), 5: 1631.
- [3] Takasu S. et al., in "Semiconductor Silicon 1977", The Electrochem. Soc. Inc., Princeton, 1977, 456.
- [4] Chambonnet D. et al., *Rev. Sci. Instrum.*, **57** (1986), 11: 2806.
- [5] 梁汉成、覃甘明、赵寿南, *仪器仪表学报*, **10** (1989), 2: 147~150.
- [6] 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), 115.
- [7] 黄岚、梁汉成、赵寿南, *红外研究*, **8** (1989), 3: 203~209.
- [8] Takano Y. et al., in "Semiconductor Silicon 1977", The Electrochem. Soc. Inc., Princeton, 1977, 695.

MEASUREMENT AND STUDY OF STRESS IN ION-IMPLANTED SILICON WAFER BY INFRARED PHOTOELASTIC METHOD

JIANG LIANSHENG ZHAO SHOUNAN LIANG HANCHENG

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

ABSTRACT

Ion-implantation stress is measured by Senarmont compensation method with the help of infrared laser photoelasticity system, based on photoelasticity principle. The stress after annealing of phosphorus ion-implantation, the distribution of the stress and the variation of stress with dose and surface concentration are studied.