

红外光弹法研究硅单晶主应力分布*

赵寿南 梁汉成 尹洪辉

(华南工学院物理系)

摘要——根据光弹原理,用自己组建的红外光弹测量系统,对硅单晶中的主应力 σ_1 和 σ_2 进行了定量测量。就金刚石结构的某些应用坐标系统,推导出应力弹光系数的张量形式,对硅单晶相对应应力-光性系数作了估算。最后,采用剪应力差法,用微型计算机算出两个主应力沿近圆形样片直径方向的分布。

一、前 言

随着硅器件(尤其是集成电路)的发展,除继续提高对硅单晶杂质和缺陷的控制水平外,对应力的认识和控制将会逐渐突出。因为,硅单晶和器件制造过程中会产生应力,晶体中缺陷、杂质沉淀物及其复合体的形成、运动、演变以及相互作用都与应力有关,这些实体周围又会产生应力场。应力的存在将会影响材料的物理和化学性质。我们认为,应该把硅单晶中的应力场看成是一个复杂的连续分布的可以变化的“广义缺陷”。研究此课题,无论在理论上和实践上都有意义。

据报道,人们用红外光弹法初步研究了硅中的应力,从硅材料发展到器件^[1~5],并从定性逐渐进入定量。kotake 等人^[6]也对封装在柯伐架上的芯片中的应力进行了定量计算。但到目前为止,有关文章只报道硅单晶中的主应力差($\sigma_1 - \sigma_2$)的值,而未见把两个主应力 σ_1 和 σ_2 分离的报道。

本文也是采用红外光弹法,在早期卧式测量系统的基础上^[4],组建了工作波长为 $1.1 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 的立式光弹系统,对硅单晶中的主应力 σ_1 和 σ_2 进行了定量测试研究。其中包括:重新推算了硅单晶在特定观测方向的相对应应力-光性系数;采用钉压法确定了样片边缘应力的符号,就二维应力问题,用剪应力差法计算出样片的主应力分布。由实验和计算结果发现硅晶体中的主应力差和主应力的最大值大致上都在同一数量级。

二、相对应应力-光性系数的估算

根据光弹原理,平面偏振红外光垂直入射有应力的平面样品时,沿主应力 σ_1 和 σ_2 方向

本文1986年6月10日收到。

* 中国科学院科学基金资助课题。

分成两个垂直分量。在弹性限度内,这两方向的折射率之差为

$$N_1 - N_2 = C(\sigma_1 - \sigma_2); \quad (1)$$

式中, C 是样品的相对应力-光性系数,在不同晶向下测量, C 值应该不同。我们对本实验中的硅单晶 C 值进行了估算。在晶体中有如下关系^[6]:

$$\Delta\beta = \pi\sigma; \quad (2)$$

σ 是二阶的应力张量; β 为二阶的介电不渗透性张量(等于介电常数张量 ϵ 的倒张量); π 为四阶的应力弹光系数张量。因硅结构的对称性,经下标简化,在 $[100][010][001]$ 坐标下, π 可用 6×6 矩阵表示,有三个独立分量 π_{11} 、 π_{12} 、 π_{44} 。我们根据坐标变换定律,分别导出了 $[112][\bar{1}10][\bar{1}\bar{1}1]$ 坐标下 π 的矩阵形式:

$$\pi = \frac{1}{36} \left\{ \begin{array}{cc} 18\pi_{11} + 18\pi_{12} + 18\pi_{44} & 6\pi_{11} + 30\pi_{12} - 6\pi_{44} \\ 6\pi_{11} + 30\pi_{12} - 6\pi_{44} & 18\pi_{11} + 18\pi_{12} + 18\pi_{44} \\ 12\pi_{11} + 24\pi_{12} - 12\pi_{44} & 12\pi_{11} + 24\pi_{12} - 12\pi_{44} \\ 0 & 0 \\ 6\sqrt{2}\pi_{11} - 6\sqrt{2}\pi_{12} - 6\sqrt{2}\pi_{44} & -6\sqrt{2}\pi_{11} + 6\sqrt{2}\pi_{12} + 6\sqrt{2}\pi_{44} \\ 0 & 0 \\ 12\pi_{11} + 24\pi_{12} - 12\pi_{44} & 0 \\ 12\pi_{11} + 24\pi_{12} - 12\pi_{44} & 0 \\ 12\pi_{11} + 24\pi_{12} + 24\pi_{44} & 0 \\ 0 & 24\pi_{11} - 24\pi_{12} + 12\pi_{44} \\ 0 & 0 \\ 0 & -4\sqrt{18}\pi_{11} + 4\sqrt{18}\pi_{12} + 4\sqrt{18}\pi_{44} \\ 12\sqrt{2}\pi_{11} - 12\sqrt{2}\pi_{12} - 12\sqrt{2}\pi_{44} & 0 \\ -12\sqrt{2}\pi_{11} + 12\sqrt{2}\pi_{12} + 12\sqrt{2}\pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -4\sqrt{18}\pi_{11} + 4\sqrt{18}\pi_{12} + 4\sqrt{18}\pi_{44} \\ 24\pi_{11} - 24\pi_{12} + 12\pi_{44} & 0 \\ 0 & 12\pi_{11} - 12\pi_{12} + 24\pi_{44} \end{array} \right\} \quad (3)$$

我们的实验是在 $\langle 111 \rangle$ 方向进行应力观测的,采用 $[112][\bar{1}10][\bar{1}\bar{1}1]$ 坐标系。设 π^* 为在 $\{111\}$ 面上的应力弹光系数的近似量,则在两主应力方向上 $\Delta\beta$ 和折射率差有如下关系:

$$\Delta\beta = \Delta\left(\frac{1}{\epsilon}\right) = -\frac{2\Delta N}{N^3}. \quad (4)$$

$$N_1 - N_2 = \Delta N_1 - \Delta N_2 = -\frac{N^3}{2} (\Delta\beta_1 - \Delta\beta_2) \simeq -\frac{N^3}{2} \pi^* (\sigma_1 - \sigma_2). \quad (5)$$

式(5)与式(1)对比得

$$C = -\frac{N^3}{2} \pi^*. \quad (6)$$

根据文献[5]给出的数据:

$$\Delta\beta_1 - \Delta\beta_2 = -11.5 \times 10^{-14} (\sigma_1 - \sigma_2) (\text{cm}^2/\text{dyn}),$$

取硅的折射率 $N = 3.42$, 则

$$C = 2.3 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{dyn}. \quad (7)$$

又,由于在{111}晶面上的平面问题中, O 是各向同性的^[7],所以在{111}面内若主应力方向不同时也可以采用式(7)来进行计算。这里算出的 O 值比我们早期采用的 $20 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ 更合理。

三、装置与测量

图1是立式红外光弹测量装置。光源采用白炽灯,滤光片能让波长大于 $1.1 \mu\text{m}$ 的红外辐射通过。从红外变象管(截止波长为 $1.2 \mu\text{m}$)得到光弹图形。该光学系统的工作波长在 $1.1 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 之间,放大倍数为 $1 \sim 100$ 倍。该装置可使样品、波片和偏振片各自作 360° 旋转的机构,精度达 0.1 度。此装置全部采用国产和自制的设备和元件组装。它既能作全场又能作小范围应力观测,既可作定性又可作定量应力分析,还具有结构紧凑,使用方便等特点。我们先后用该装置对某些单位生产的硅单晶棒中应力情况进行了检测;对热处理与应力的关系进行了研究;并用光度计法对分数级条纹值的测量结果进行了误差分析;其结果都证实了此装置有一定的精度和较好的实用性。有关实验内容简述如下:

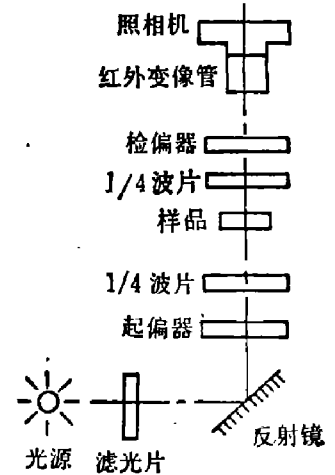


图1 红外光弹测量装置
Fig. 1 IR Photoelastic measurement apparatus.

从硅单晶棒上切取 $3 \sim 10 \text{ mm}$ 厚的样片,用半导体常规的工艺(研磨、抛光、清洗和烘干)制片,使两个表面平整、无损伤和相互平行(厚度差不超过 $20 \mu\text{m}$)。把样品放入光弹装置中,在平面暗场下,先确定某一开始位置,把此时的正交偏振轴定为 0° ,则可得到等差线和参数为 0° 的等倾线^[8]。保持两偏振轴正交,同时转动起偏器和检偏器某一角度 θ ,那么 0° 的等倾线将消失(等差线不变),而出现参数为 θ 的等倾线。从 0° 到 90° 依次同步旋转正交的两偏振器,就可得到由 0° 到 90° 逐渐改变的一系列等倾线。用照相机把每次的等差线和等倾线拍摄下来,就可在投影仪上绘制出定量计算所需的等差线和等倾线的总图(如图2)。

四、主应力分布的计算

从弹性力学的原理来说,有了某试样的完整的等差线和等倾线等资料后,就可以求出试样各点的应力和应变。本文采用剪应力差法^[8],并用二维应力近似,分析计算了半导体硅单晶片中主应力 σ_1 和 σ_2 的分布。

下面介绍某一硅样片(近园形的原生外形)的主应力分布的计算。该样片的厚度为 9.3 mm ,其测量得到的等倾线和等差线如图2(放大2倍)所示。图上标出了坐标的辅助截面(AB、CD)。图中间距 $\Delta y = 3.5 \text{ mm}$;相邻两点的距离 $\Delta x = 3 \text{ mm}$;P为边界点,各点的编号 $i = 0 \sim 24$ 。

计算PQ截面上各点主应力的步骤是:(1)求出各点的剪应力差。用等差线和等倾线计算辅助截面AB和CD上各点的剪应力 σ_{xy} 及各点的剪应力差 $\Delta\sigma_{xy} = (\sigma_{xy})_{AB} - (\sigma_{xy})_{CD}$ 。(2)计算各点的 $(\sigma_{xx})_i$ 和 $(\sigma_{yy})_i$;先确定边界点P的 $(\sigma_{xx})_P$ 的大小。由于该点的等差线级数

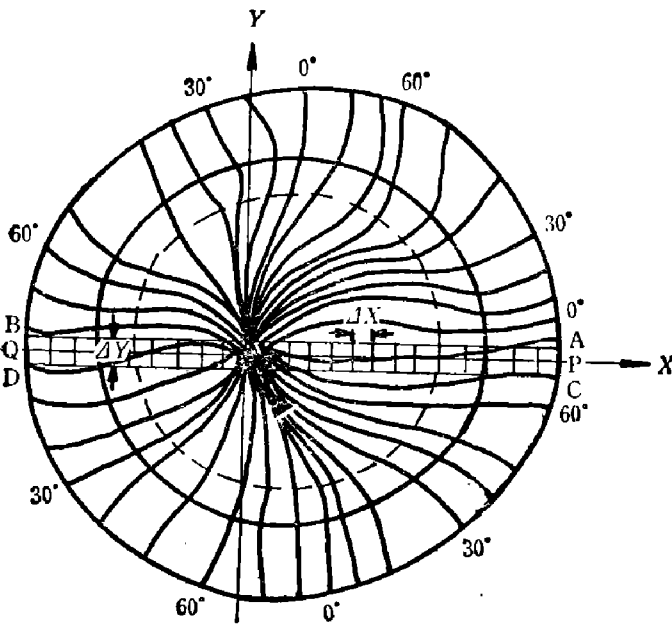


图2 某样片的等倾线和等差线

Fig. 2 Isoclinic and isochromatic lines of a sample.

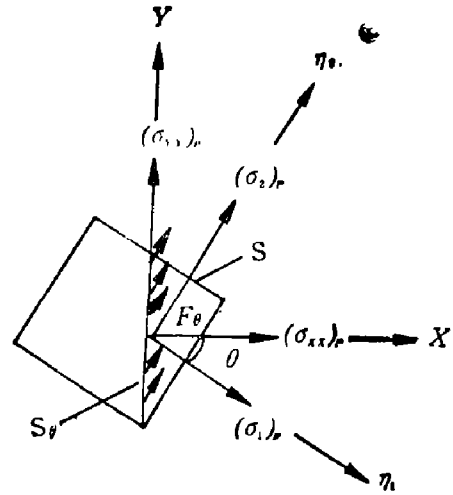


图3 P点的应力单元体

Fig. 3 Stress unit of the point P.

为1.3级, 又用钉压法^[8]可知P点受压应力 $(\sigma_1)_P = 0$, $(\sigma_2)_P = -1.3$ 级。图3表示了P点的平面应力单元体, 其中的横截面S与斜截面 S_θ 的关系为

$$S = S_\theta \cdot \sin \theta. \quad (8)$$

以应力 F_θ 代表截去部分对留下部分的作用。如果该单元体足够小, 则 F_θ 可以看作是均匀分布于 S_θ 面上的, 其方向沿 η_2 轴。所以,

$$(\sigma_2)_P \cdot S = F_\theta \cdot S_\theta. \quad (9)$$

又由于 F_θ 沿x轴方向的分量为

$$(\sigma_{xx})_P = F_\theta \cdot \sin \theta; \quad (10)$$

于是,

$$(\sigma_{xx})_P = (\sigma_2)_P \sin^2 \theta. \quad (11)$$

从图2可知, P点的等倾角 $\theta = -16.7^\circ$, 代入上式可以算出 $(\sigma_{xx})_P = -0.107$ 级。边界点的 $(\sigma_{xx})_P$ 算出来后, 就可以根据剪应力差法从边界点开始计算出各点的 $(\sigma_{xx})_i$; 从而算出 $(\sigma_{yy})_i$ 。(3) 根据下式计算出两个主应力。

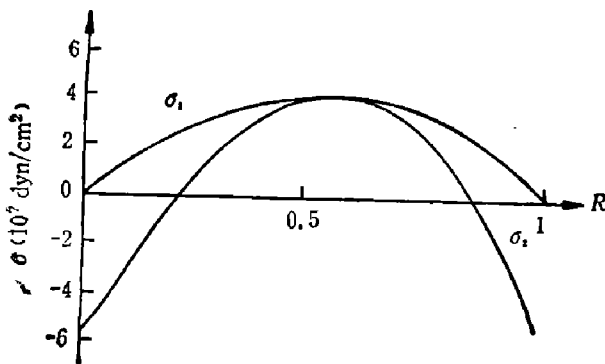


图4 Pθ截面上两主应力的分布曲线

Fig. 4 Distribution of the two principal stresses on the Pθ section.

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \\ \sigma_2 = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \end{cases} \quad (12)$$

最后的结果如图4所示。图中, 纵轴表示应力值, 单位为 10^7 dyn/cm^2 ; 横轴R是归一化的计算截面的坐标。由该图可以看出, 在样片边缘, 主应力 $\sigma_1 = 0$, 而另一个主应力 σ_2

为负值; 在样片中央区域, 两个主应力都为正值。即该硅单晶样片的边缘附近存在压应力,

而中央部分却存在张应力。另外,从主应力分离的结果看来,主应力的数量级与主应力差的数量级大体一致。

由于在计算过程中,需要处理的数据和计算步骤较多,所以我们编出了 BASIC 程序,采用微型计算机进行计算。

参 考 文 献

- [1] Lederhandler S. R., *J. Appl. Phys.*, **30** (1959), 1631.
- [2] Denicola R. O. and Tauber R. N., *J. Appl. Phys.*, **42**(1971), 4262.
- [3] Takasu Shin. et al., *in: Semiconductor Silicon 1977*, The Electrochem. Soc. Inc., Princeton, 1977, 456.
- [4] 赵寿南等, *华南工学院学报*, **9** (1981), 4: 121.
- [5] Kotake H. and Takasu Shin., *J. Electrochem. Soc.*, **127**(1980), 179
- [6] 蒋民华, *晶体物理*, 山东科学出版社, 1980.
- [7] 周佐平等, *红外研究*, **5**(1986), 1: 51, ~58.
- [8] 大连工学院数力系光测组, *光弹性实验*, 国防工业出版社, 1978.

STUDY OF THE DISTRIBUTION OF PRINCIPAL STRESSES IN SILICON CRYSTAL BY INFRARED PHOTOELASTIC METHOD

ZHAO SHOUNAN, LIANG HANCHENG, YIN HONGHUI
(*Department of Physics, the South China Institute of Technology*)

ABSTRACT

Quantitative measurement for principal stresses σ_1 and σ_2 in silicon crystal is made with the infrared photoelastic equipment built by the authors. In order to measure the stresses as accurately as possible, the tensor of piezo-optical coefficient of stresses in some coordinate systems of diamond structure is derived. The relative stress-optical coefficient of silicon crystal is estimated. By the shearing stress difference principle, the distribution curves of the two principal stresses along the diameter of silicon wafers are plotted with a microcomputer.