

用红外光弹仪测量研究硅单晶应力

周佐平 余焕霓 杜警鸣 肖克波 李文江

(华南工学院物理系)

摘要——本文报道了用红外光弹观测仪定量测量和研究硅单晶残余应力, 测定主应力方向和主应力差。为定量计算主应力差, 我们给出了几种判别干涉条纹级次的方法。介绍了硅单晶出现残余应力的几种情况。

一、测量方法

根据硅单晶能透过红外辐射和双折射的光程差与主应力有关, 利用偏振光干涉原理, 可由干涉图来测量硅单晶中的主应力差。

经计算, 红外偏振光通过硅单晶片形成的干涉图样各点光强^[1]为

$$I = k\alpha^2 \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\alpha}{2}, \quad (1)$$

式中 k 为比例常数, α 是入射光的振幅, θ 是晶体相应点的主应力方向与偏振轴的夹角, α 是经晶片后产生两束偏振光的相位差。

1. 用等倾线测定晶片主应力的方向

从式(1)可见, 当 $\sin 2\theta = 0$ ($\theta = 0^\circ$ 或 $\theta = 90^\circ$) 时, 光强 $I = 0$, 形成消光。这说明只要晶片上某点的主应力方向与偏振轴重合, 该点就是暗点。若晶片有一系列这样的点, 它们的主应力方向都与这时的偏振轴重合, 则这一系列的点就构成黑线, 在这黑线上每个点的主应力倾角都相同, 这就是等倾线。因此, 用等倾线就可以求出晶片上各点主应力的方向。

一般来说, 晶片平面内各点主应力的方向是逐点不同的, 而且是连续变化的。我们如果从一个位置开始, 同步同向转动起偏振镜和检偏镜, 并使它们始终保持正交, 那么等倾线将连续地移动到晶片的另外一些点上, 这些点的主应力方向将与新的偏振轴方向平行。对于起偏镜和检偏镜的每一个不同转角, 我们都可以得到一组相应倾角参数的等倾线。图 1 给出硅样品在 0° , 20° , 40° , 60° , 90° 时所拍得的干涉图。

2. 等差线和主应力差计算

从式(1)的第二个消光因素可得, 对应晶片上某处光程差 $R = n\lambda$ ^[1] 将呈现消光黑点, 同时满足此条件的诸点便构成黑色条纹, 即等差线。在样品两边加入一定方位的两个四分之一波片就可消去等倾线, 得到单纯的等差干涉图^[2]。图 2 表示硅单晶等差光弹图。

本文 1982 年 12 月 20 日收到。修改稿 1983 年 4 月 24 日收到。

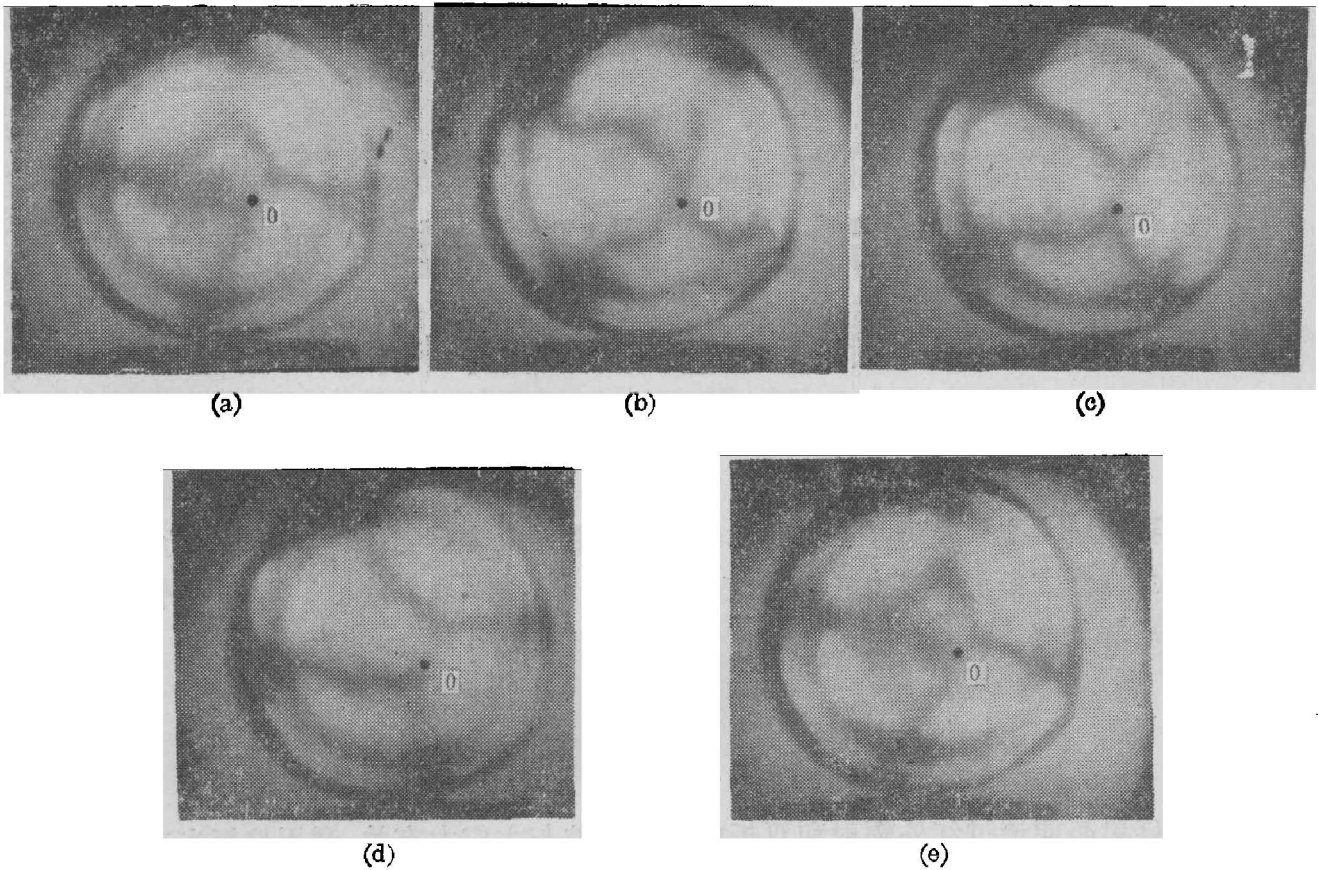


图1 硅样品不同等倾角光弹图
(a) 0° (b) 20° (c) 40° (d) 60° (e) 90°

根据主应力差与光程差的关系 $R=C(\sigma_1-\sigma_2)d$, 得

$$\sigma_1-\sigma_2=\frac{\lambda}{C} \cdot \frac{n}{d} \quad (2)$$

对硅单晶来说, 沿 [111] 方向光常数 $C=2 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$; 对我们使用的仪器^[1] 来说, 中心波长 $\lambda \approx 1.2 \mu\text{m}$, 晶片厚度 d 是可以测定的, 因此定量计算主应力差的关键是确定干涉条纹的级次 n 。由于残余应力的分布是不规则的, 而且硅晶片脆性很大, 外施载荷不方便, 所以确定级次 n 是比较困难的。

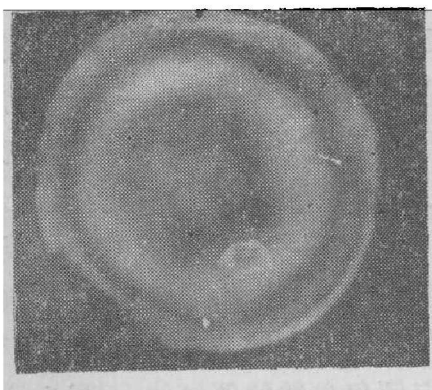


图2 硅单晶等差光弹图

首先要解决的问题是确定零级。从下面讨论可知, 若掌握零级条纹的特点, 就能进一步确定其它级次条纹。

在一般可见光光弹技术上, 用白光观察, 可见到彩色的干涉图, 任何波长对应的零级消光条纹的位置是相同的, 所以对零级条纹是黑色条纹, 而对其它级次的条纹是彩色的, 因为不同的波长对应的同一级次的位置不同。若没有零级条纹, 则可用改变载荷的方法或用干涉色来判定整数级次。这些对红外观测均不适用。必须通过红外变象装置观测干涉图象。对任何红外波长, 经变象后都只能看到随光强而变的黑白色(没有彩色); 对零级或其它整数级次的消光条纹均为黑色, 这给判别零级和其它级次带来困难。

根据消光条件 $R=n\lambda$, 以严格的单色光作光源, 不论 n 为何值, 即不论那一级消光光强为零, 均为黑色。若用复色光(波长范围为 $\Delta\lambda$), 对非零级 ($n \neq 0$), 不同波长的光有不同的程

差。当 n 越大, 光程差 $\Delta R = n \Delta \lambda$ 越大。此时某一位置对应于某一波长消光, 但对另一波长则并不完全消光, 所以对这一位置总光强并不完全为零, 故其黑度较小。而对零级, 光程差为零的位置则仍然对所有波长都是相同的, 所以总光强仍为零, 故其黑度较大。由此可见, 在采用复色光情况下, 零级条纹黑度最大, 而随着级次的增加, 黑度减小, 条纹变宽变模糊, 这是判别零级条纹和其它级次的重要依据。我们把已知冻结应力的环氧树脂标准模型放在红外光弹观测仪上进行观测和比较, 证实了上述分析。

在理论上, 从消光条件的光程差 $R = O(\sigma_1 - \sigma_2)d = n\lambda$ 可知, 干涉图中有哪一级次条纹, 主要取决于晶片内主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 的分布。实验表明, 在使用 $1.1 \sim 1.3 \mu\text{m}$ 的复色光时, 若干涉图中同时出现一级和二级以上条纹, 则从黑度上是很容易区分的; 但在同时出现一级与零级条纹的情况下, 有时黑度并不容易区分, 还要采取一些辅助方法来确定零级和其它级次。辅助方法有:

(1) 各向同性点法。因为在各向同性点处 $\sigma_1 = \sigma_2$, 任何一方向都是主应力方向, 所以各种不同参数的等倾线都通过它。如图 1 中所标出的 O 点, 这一点必通过零级等差线。所以用平面偏振光, 同步旋转偏振片, 仔细观察是可以找到这样的点的。这个方法的缺点是不容易观察, 对不是各向同性点的零级条纹则无法确定。

(2) 倍增法。让偏振光通过样品往返多次, 使条纹倍增。我们采用反射式倍增^[1], 可以很快地从两倍增至四倍, 此时零级以上条纹均发生变化, 只有零级条纹中心是不变的, 由此便可判断零级。

(3) 补偿法。用特制的巴比涅-索利尔补偿器(补偿范围可达 4λ), 对待定条纹进行补偿。和一般光弹技术中使用补偿器方法相同^[2], 在平面偏振光场下将补偿器十字丝与主应力方向重合, 然后在圆偏振光场下, 沿正、负两个方向补偿, 直致出现最黑条纹。通过对比就可以知道, 其中一个方向是朝黑度较大的补偿方向, 依次出现消光条纹, 其中最黑的便是零级条纹; 然后测量所选各点朝零级方向的补偿读数, 若补偿器鼓轮读数为 x , 则补偿的程差为

$$\omega x = n\lambda,$$

因此得到级次

$$n = \frac{\omega x}{\lambda},$$

ω 为补偿器的比例常数, 测量前已标定。若使用精度较高的补偿器, 可测到 $1/1000$ 级。

图 2 的等差线图, 其条纹级数就是用上述方法确定的, 结论是: 中间附近的消光条纹为零级, 近外沿的条纹为一级。对这一晶片(厚度 $d = 9.9 \text{ mm}$), 在一级条纹位置上各点的主应力差值为

$$|\sigma_1 - \sigma_2| = \frac{\lambda}{C} \cdot \frac{n}{d} = 5.6 \times 10^6 \text{ N/m}^2,$$

这就解决了主应力差的定量计算问题。

二、硅单晶残余应力观测实例

1. 位错产生的应力。如图 1, 硅片在生长过程中形成大量滑移位错。对 (111) 面腐蚀观察, 此硅片滑移位错密度达 $10^5/\text{cm}^2$, 且大体沿轴对称分布。因位错而形成的应力差分布也大体按轴对称分布。

2. 热应力。 图3是硅单晶尾部一样品热应力的光弹图。从图可见它存在复杂的应力分布。经对(111)面腐蚀后观察位错密度很小,由此可见,它的主应力分布主要不是位错造成,而是由于在生长过程中温度不均匀而产生的冻结了的热应力。所以,利用光弹图可以研究改进单晶生长工艺。

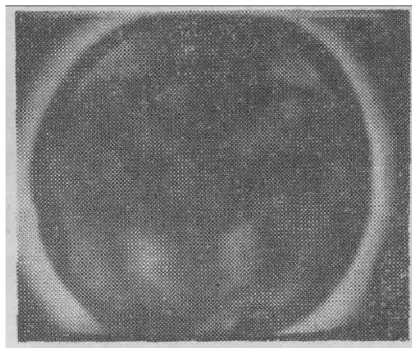


图3 反映热应力的光弹图

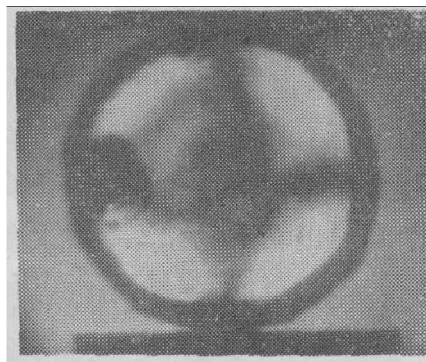


图4 反映机械损伤的光弹图

3. 机械加工引入的应力。 机械加工,特别是机械损伤会造成明显的不均匀应力分布。应用光弹图能快速、直观地检测这种应力。图4是受到机械损伤的样品的光弹图(损伤位置在左边黑影范围内)。

另外,我们还观察到硅晶片在高温生成氧化层时,由于骤冷形成的温度梯度在晶片边缘产生的残余应力。

致谢——梁经锐同志参加了部分工作,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 周佐平等,红外研究, 2 (1983), 219~222.
- [2] 天津大学材料力学教研室光弹组主编,光弹性原理及测试技术,科学出版社,1980.

MEASUREMENT AND STUDY OF THE STRESSES IN SILICON CRYSTAL WITH INFRARED POLARISCOPE

ZHOU ZUOPING, YU HUANNI, DU JINGMING, XIAO KEBO, LI WENJIANG
(Department of Physics, South China Institute of Technology)

ABSTRACT

This paper deals with the quantitative measurement and study of the residual stresses in silicon crystal with infrared polariscope made by ourselves. The ways to determine the direction of the principal stresses and the difference between them are demonstrated. In order to calculate the difference between the principal stresses quantitatively, several methods have been found to determine the different orders of the fringes. Finally, a description is given to the cases in which the stresses in silicon crystal appear.