

红外无损检测技术的传热学分析

陈 珏

(东南大学电子工程系, 江苏, 南京, 210096)

TN 215/6

摘要 介绍了一维导热方程、边界条件及初始条件, 推出了有缺陷区和无缺陷区的样品的表面温度, 计算了含有脱粘区的键合硅片的表面温度差与加热时间、脱粘区厚度等关系, 并用红外热像仪进行了实验测量。

关键词 红外无损检测, 脱粘, 表面温度差。

传热学 红外热像仪

HEAT TRANSFER ANALYSIS OF INFRARED NONDESTRUCTIVE TESTING

CHEN Jue

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract One-dimensional equation of heat conduction, its initial conditions and boundary conditions were described. The surface temperature difference between the flawed and the unflawed regions was given. The surface temperature difference versus heating time, delamination thickness in bonding silicon wafers containing delamination was calculated. The experiment was carried out by using an infrared thermal imager.

Key words infrared nondestructive testing, delamination, surface temperature difference.

引言

在红外无损检测中, 如果对被测物体注入恒定热流, 当样品内部存在缺陷时, 由于缺陷与无缺陷区的热扩散系数不同, 样品表面相应位置的温度就会有差异。利用样品表面的温度异常变化, 就可以确定样品内部缺陷的性质、形状、大小和深度。常用的检测装置有红外热像仪或热敏涂料。

1 传热学分析和计算实例

图1为含有缺陷的平板材料, 当缺陷的横截面积远大于平板厚度时, 忽略热流的横向扩散, 只考虑厚度方向的传递, 问题就简化为一维热传导模型。这时, 有缺陷区域和无缺陷区域的温度分布可以分开独立求解。

如果用 $T_1(x, t)$, $T_2(x, t)$ 分别表示无缺陷区域和有缺陷区域的瞬态温度分布, 这两个对应区域的表面温度分布为: $T_1(0, t) = T_{1s}(t)$, $T_2(0, t) = T_{2s}(t)$ 。其中下标 s 表示这两个区域的表面温度。这两个区域的表面温差为:

$$\Delta T(t) = T_{2s} - T_{1s}(t), \quad (1)$$

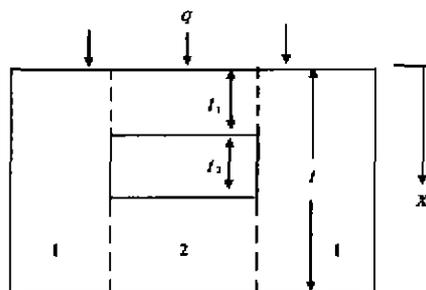


图1 含有缺陷的平板材料
Fig. 1 Plane material with flaws

没有缺陷区域的一维热传导方程为^[1]:

$$\frac{\partial^2 T_1(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{a_1} \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial t}, \quad 0 \leq x \leq l \quad (2)$$

表面满足能量守恒定律条件为:

$$\text{当 } x = 0, q'' - h[T_1(0, t) - T_\infty] + k_1 \frac{\partial T_1(0, t)}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

$$\text{当 } x = l, h[T_1(l, t) - T_\infty] + k_1 \frac{\partial T_1(l, t)}{\partial x} = 0; \quad (4)$$

式中 k_1 为材料的热传导率, a_1 为材料的热扩散率, h 为材料表面的热转换系数, T_∞ 为环境温度。

有缺陷区域可以看作3个并列的薄层, 其导热方

程为:

$$\frac{\partial^2 T_2(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_i} \frac{\partial T_2(x,t)}{\partial t}, \quad x_i \leq x \leq x_{i+1} \quad (5)$$

式(5)中 $x_1=0, x_2=l_1, x_3=l_1+l_2, x_4=l, \alpha_3=\alpha_1; T_2(x,t)$ 表示第 i 层的温度分布。

两个薄层之间满足温度连续性的条件为:

$$T_2(x_{i+1},t) = T_{2+i}(x_{i+1},t), \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

根据两个薄层之间热流的连续性有:

$$k_1 \frac{\partial T_{22}(x_2,t)}{\partial x} = k_2 \frac{\partial T_{22}(x_2,t)}{\partial x}, \quad (7)$$

$$k_2 \frac{\partial T_{22}(x_3,t)}{\partial x} = k_1 \frac{\partial T_{23}(x_3,t)}{\partial x}; \quad (8)$$

式中 k_2 为杂质的热传导率, 初始条件为:

$$T_2(x,0) = T_\infty, \quad x \leq x_{i+1} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (9)$$

为分析简单起见, 引入过剩温度 $\theta_1(x,t)$ 的新变量, 其定义为:

$$\theta_1(x,t) = T_1(x,t) - T_\infty, \quad (10)$$

在边界条件下齐次化时,

$$\theta_1(x,t) = \theta_{1s}(x) + \theta_{1t}(x,t), \quad (11)$$

式(11)中, $\theta_{1s}(x)$ 为稳态解, $\theta_{1t}(x,t)$ 为瞬态解。

把式(10), (11)代入 $T_1(x,t), T_2(x,t)$ 的微分方程和边界条件中, 利用分离变量法可求得, 当 $x=0$ 时的 $T_{1s}(x,t), T_{2s}(x,t)$ 为:

$$T_{1s}(t) = T_\infty + \frac{q'' + (1+B_1)}{h(2+B_1)} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n e^{-\alpha_1 \lambda_n^2 t}, \quad (12)$$

$$T_{2s}(t) = T_\infty + \frac{q''(1 + \sum_{m=1}^3 B_{1m})}{h(1 + \sum_{m=1}^3 B_{2m})} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\alpha_1 \beta_n^2 t}, \quad (13)$$

式(12), (13)中 q'' 为输入热电流; B_i 为毕奥数, $B_i = \frac{hl}{k}$, A_n, b_n 为傅里叶变换系数^[2], λ_n, β_n 为本征值; $B_{1m} = \frac{h(x_{m+1} - x_m)}{k_m}$ 。

在红外无损检测中最感兴趣的是表面温度 $T_{1s}(t), T_{2s}(t)$ 和表面温度差 $\Delta T(t)$ 的具体数值。这对于选择合适的检测设备及其灵敏度至关重要。我们以含有脱粘区的键合硅片为例, 根据数值法计算, 作出几组样品的计算曲线。

2 实例分析

有一厚度 $l=480\mu\text{m}$ 的键合硅片, 在表面下 $l_1=240\mu\text{m}$ 处有一深度为 $d=0.4\mu\text{m}$ 的缺陷(脱粘)。将样

品置于 20°C 的环境中, 在底部加以 60°C 的恒定热流, 可利用数值法^[3], 求得样品表面有缺陷区和无缺陷区的温度差 $T_{1s}(t)$ 和 $T_{2s}(t)$, 从而求出这两个区域的温度差 $\Delta T_s(t)$ 。

在利用数值法对图 2 所示样品进行计算时采用的热物理参数如表 1 所示, 计算中所用的二氧化硅的热转换系数 $h=0.005\text{w}/\text{cm}^2$, 计算结果见图 3、图 4、图 5 和图 6。

由图 3 可见, 由于硅片的热扩散系数较大, 且样品很薄, 所以温度分布达稳态的时间极短。在稳定时的 ΔT 很小, 因此缺陷显示度也相应很小。在这种情况下

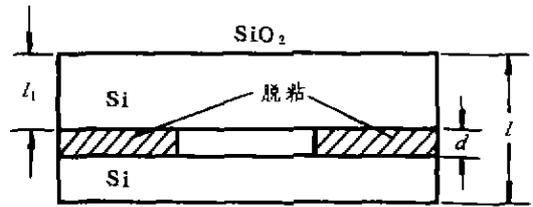


图 2 样品模型
Fig. 2 Model of the specimen

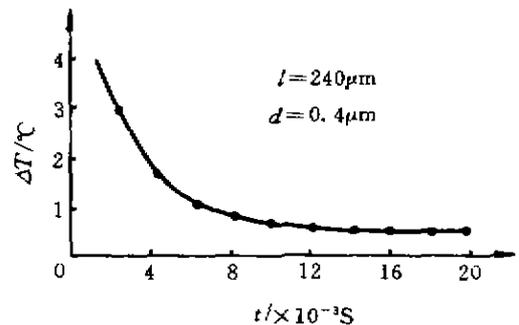


图 3 表面温度差与加热时间的关系
Fig. 3 The surface temperature difference versus heating time

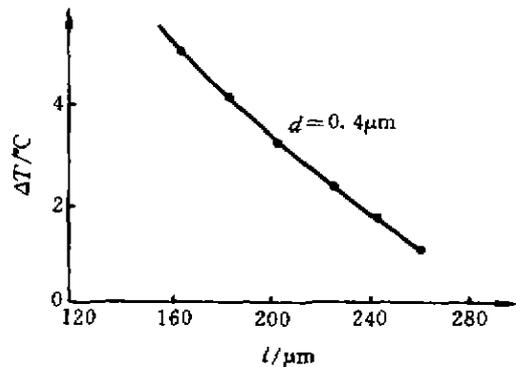


图 4 表面温度差与脱粘区离上面深度的关系
Fig. 4 The surface temperature difference versus delamination depth

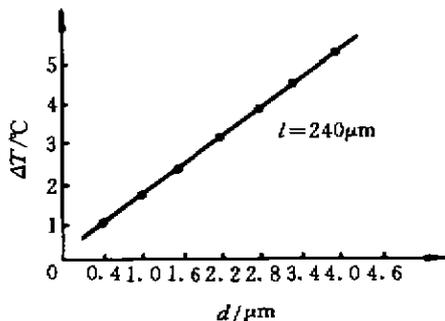


图 5 表面温度差与脱粘厚度的关系
Fig. 5 The surface temperature versus delamination thickness

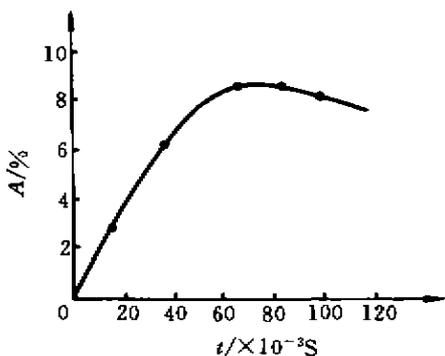


图 6 键合硅片缺陷显示度与延迟时间 t 的关系
Fig. 6 The defect revealability in bonding silicon wafers versus delay time t

表 1 样品的热物理参量

Table 1 The thermophysical properties of specimen

| 参 数 | $K(\text{w}/\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ | $C_p(\text{J}/\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ | $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$ |
|------|--|---|------------------------------|
| 硅 | 1.45 | 6.95 | 2.33 |
| 二氧化硅 | 1.40×10^{-2} | 7.42 | 2.27 |
| 空 气 | 2.83×10^{-4} | 1.005 | 1.093×10^{-3} |

如果用稳定法来测量的话,就得不到好的显示度.为了获得较高的缺陷显示度,拟彩和瞬态法较为合适,并在注入热流的同时进行测量.

由图 4 曲线可见,随着缺陷在材料内部的深度增

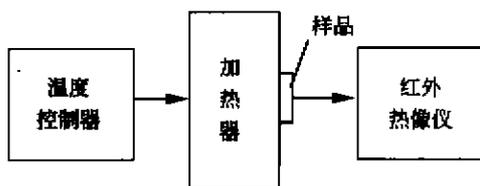


图 7 实验装置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the experimental set-up

加,表面温度差逐渐减小,这是由于缺陷上方的材料将热量扩散,从而使表面温度降低的缘故.图 5 表示脱粘厚度愈大,表面温差就愈大,这时更易于检测.

通常用缺陷显示度作为检测缺陷的标准^[4]:

$$A = \Delta T_s / T_s \quad (14)$$

式(14)中 ΔT_s 为有缺陷的区与无缺陷区的表面温度差; T_s 为缺陷区的中心处的表面温度.根据计算,本例中的缺陷显示度与延迟时间的关系见图 6.由图 6 不难看出,缺陷显示度随延迟时间而改变.我们把显示度 A 对应的时间称为最佳延迟时间,这也是最佳观察时间.

3 实验与结果分析

利用 AGA780 红外热象仪对键合硅片内部脱粘区进行实验观察,测量装置如图 7 所示.

将直接键合后的硅片紧贴在加热器的等温面上,根据以上理论计算结果的提示,我们采用瞬态法进行测量,边注入热流边测量.调节热像仪扫描器与样品之间的距离,使待测样品在热像仪荧光屏上清晰成像.图 8 是键合后硅片的红外热像图.图 8 中发亮部分表示键合好的区域,旁边较暗的部分则是脱粘区域.因为未键合好的脱粘区域较键合好的区域的热阻大,因此当在样品背面加热时,脱粘区的样品表面较键合好区域的表面温度低,相应的热图像的亮度要暗一些.

在检测过程中,通过控制加热时间达到控制热流注入样品的深度.由于硅片的厚度很薄,因此加热温度不宜过高,加热时间不宜过长,以热像仪荧光屏上能清晰成像为宜.值得注意的是在检测时表面务必保持清洁.加热器与样品应保持良好的接触.如果以上几点能得到掌握,那么热图像上温度的不均匀将归结于样品内部的脱粘和缺陷.



图 8 含有脱粘区的键合硅片

Fig. 8 Bonding silicon wafers containing delamination

4 结语

通过理论计算和实验测量比较,我们发现实际测量时的最佳缺陷显示度的时间要比理论计算所得的长一些,这是因为在进行一维计算时忽略了横向热扩散、辐射热阻和接触热阻,使计算结果偏差。

我们认为,如果理论计算的最佳加热时间很短的话,采用瞬时法较为合适;反之,则用稳态法。

REFERENCES

- [1] YU Chang-Ming. *Heat Conduction and Its Numerical*

Analysis, Beijing: Tsinghua University Publishing House (俞昌铭. 热传导及数值分析, 北京: 清华大学出版社), 1982: 394-442

- [2] Hildebrand F B. *Advanced Calculus for Application*, second edition, New Jersey: Prentice Hall, 1976: 214-218

- [3] CHEN Jue. Numerical calculation of two-dimensional heat conduction for infrared nondestructive testing, *Laser & Infrared* (陈珏. 红外无损检测的二维热传导数值计算, *激光与红外*), 1990, 20(3): 41-45

- [4] CHEN Jue. The defect revealability for infrared nondestructive testing, *J. Infrared Millim. Waves*, (陈珏. 红外无损检测中的缺陷显示度, *红外与毫米波学报*), 1991, 10(4): 281-284