

42-47

硅晶闸管烧结应力的红外光弹性研究*

彭海鲸 赵寿南

TN340.7

(华南理工大学应用物理系, 广东, 广州, 510641)

摘要 参考热弹性理论和复合材料层间应力理论, 研究了Si片/Al箔/Mo片烧结后的层间应力及硅片中的应力. 热膨胀性能不同引起的热应力在硅片中的中间和边缘区域分布情况不一样, 推导出适用于边缘区域的应力计算表达式. 用红外光弹测量获得晶闸管烧结工艺制备样品的应力分布光弹图. 理论能较好地解释实验结果.

关键词 硅、应力、烧结、光弹性、晶闸管.

红外光弹性

引言

研究表明, 在硅单晶和器件制备过程中引入应力^[1~5], 应力的存在对其性能和成品率都有一定的影响. 对大功率半导体器件的应力研究一直是个非常重要的课题. 本文利用红外光弹性研究硅大功率晶闸管中常用的Si/Al/Mo管芯烧结工艺中的应力. 此方法具有理论比较成熟、灵敏度高、易于与先进技术相结合等特点. 对硅晶片边缘区域应力进行了分析, 推导出硅片边缘区域的应力分布. 我们相信本文的研究对降低功率器件中应力的负作用具有较好的参考价值, 并为硅导体材料与器件的红外无损检测提供了一有效方法和理论依据.

1 样品制备

本文采用的样品硅片是生产200A晶闸管专用n型晶片, (111)晶面, 电阻率为20~30 $\Omega \cdot \text{cm}$, 厚度为0.04cm. 沿晶向 $[\bar{1}\bar{1}2]$ 、 $[1\bar{1}0]$ 切割成1.2cm \times 0.6cm的矩形片, 打磨、抛光两个入射光(110)侧面使其平整、光亮且相互平行, 将样品按Si/Al/Mo层叠在晶闸管生产线上进行烧结. 铝箔和钼片的厚度分别为 3.5×10^{-3} cm、0.2cm, 烧结工艺条件为温度700 $^{\circ}\text{C}$ 、时间10min、气压为0.133Pa.

2 测量原理和设备

对各向同性介质用光弹性测应力是工程力学上比较成熟的一种方法. 此方法以应力-光性定理为基础, 采用的是可见光^[6]. 硅晶体在应力作用时会由光的各向同性转变为各向异性, 产生双折射现象. 理论和实验证明硅晶体折射率椭球的主轴与其应力椭球的主轴相重合, 已得到其各向异性的相对应力-光性系数^[4], 硅的禁带宽为1.1eV, 可透过波长为1.152

* 广东省自然科学基金(编号924-314)资助项目
稿件收到日期 1997-04-15, 修改稿收到日期 1997-10-17

$\times 10^{-4}\text{cm}$ 的红外辐射, 这些是用红外光弹法无损测量硅单晶应力的主要理论基础和方法依据. 本实验采用的红外光弹系统如图 1 所示, 主要光学元件和仪器是 Oriel、Newport、Spectra-Physics 公司的产品. 实验获得 $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 方向侧面进光的红外光弹图形后, 运用二维应力-光性定律, 相对应力-光性系数取 $1.59 \times 10^{-12}\text{cm}^2/\text{dyn}$, 即可计算各级等差线上的应力值(参见后文); 也可采用森纳蒙特法来计算非等差线上的应力值^[4-6].

3 实验结果与分析

图 2 是实验观察到的硅应力光弹图. 由图可知, 在样品的中间区域只有一条平行于界面的应力等差线条纹, 而在边缘区域 0.2cm 范围内, 应力条纹较多, 与表界面斜交. 实验测得硅中次主应力差值为 $10^8\text{dyn}/\text{cm}^2$ 数量级(除边缘自由边界外, 参见后文).

由图 2 知, 烧结后样品硅片的应力分布在中间和边缘区域不同, 我们认为这是由于烧结过程中硅片和铜片的接触界面引入了层间应力所致. 硅片和铜片通过铝箔烧结成一体(铝作为焊料), 当温度从烧结温度降至室温时, 一方面由于热膨胀系数的不同, 二者的变形不同; 另一方面, 二者又通过铝硅铜共晶层构成一体, 各自的变形必须协调一致达到受力平衡. 这样, 它们之间就必然出现变形的相互制约, 从而产生层间应力. 硅的热膨胀系数小于铜, 因此硅片中引入了压应力, 铜片中引入张应力. 考虑样品中微体元的受力情况: 在中间区域, 硅片和铜片的微体元满足力平衡条件, 无层间应力(严格地讲, 层间应力很小, 可忽略); 在边缘区域, 包括自由边界的硅片和铜片的微体元由于其自由边界上的正应力为零, 二者的界面必定引入层间剪应力以平衡体内的正应力. 层间剪应力的存在, 必然会出现层间正应力. 综上所述, 硅和铜的热膨胀性能的不同以及自由边界的存在导致层间应力的产生. 集中边缘的层间应力造成硅片中的应力分布在中间和边缘区域的不同. 特别当铜片较厚时, 应力分布的这种现象尤为明显.



图 2 烧结后样品的应力光弹图

Fig. 2 Pattern of stress photoelasticity of silicon wafer after sintering

对硅片应力条纹平行于表界面的中间区域应力的分析, 已有学者研究过^[1,4]. 因此, 本文重点分析和讨论硅片边缘区域的应力分布情况. 一般说, 硅片和铜片均处于三向受力状态, 理论求解困难. 我们为此作了一些假设, 认为硅片和铜片均遵守虎克定律, 二者的变形在弹性范围内, 并忽略铝箔厚度及其对层间应力的影响, 将样品看为有限宽长条的情形. 我们根据张福范的双金属条接触热应力理论先求解层间应力分布^[7,8], 进而求出硅片中的应力分

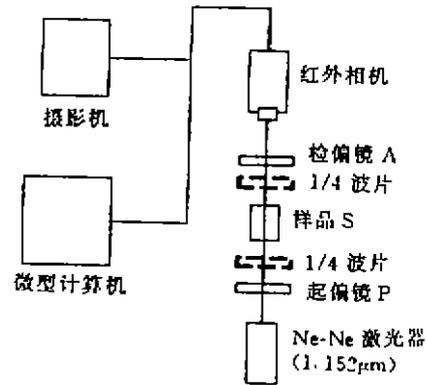


图 1 红外光弹系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the infrared photoelastic system

布. 如图3所示, 样品长度为 $2L$, 宽度为 b , 厚度为 t . 以正弦级数和余弦级数分别表示层间剪应力 τ 和层间正应力 σ , 即

$$\tau = \sum_{n=1} a_n \sin \frac{n\pi x}{L}, \quad \sigma = \sum_{n=1} b_n \cos \frac{n\pi x}{L}. \quad (1)$$

式中 a_n, b_n 均为未定系数.

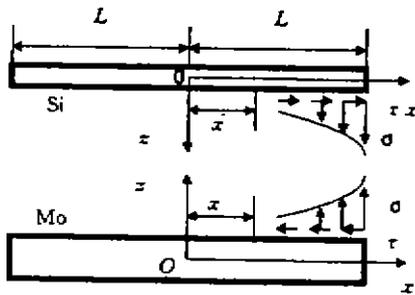


图3 Si片与Mo片间的层间应力
Fig. 3 Interlaminar stress between the silicon wafer and molybdenum wafer

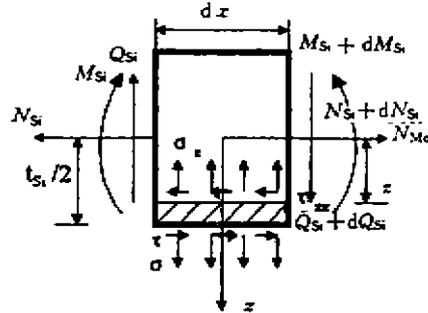


图4 硅中微段受力图
Fig. 4 Force diagram of microsegment in silicon

以相邻为 dx 的两横切面, 自硅长条截取一微段 dx (见图4), 用 N_S, Q_S, M_S 分别表示作用在横切面上的轴力、剪力与弯矩, 由微段平衡得

$$\left. \begin{aligned} dN_S/dx &= -b\tau, \\ dQ_S/dx &= -b\sigma, \\ dM_S/dx &= Q_S - bt_S\tau/2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

同样, 自Mo条截取一微段 dx , 用 N_{Mo}, Q_{Mo}, M_{Mo} 分别表示作用在横切面上的轴力、剪力与弯矩, 也有类似式(2)的另一组方程.

由方程组(1)和(2)即可推得 $N_S, Q_S, M_S, N_{Mo}, Q_{Mo}, M_{Mo}$ 的级数表达式. 硅片和钼片的曲率相等, 即

$$M_S/E_S I_S = M_{Mo}/E_{Mo} I_{Mo}, \quad (3)$$

I_S, I_{Mo} 分别为硅片与钼片的横切面对其中性轴的转动惯量. 代入 M_S, M_{Mo} , 得

$$b_n = k a_n n, \quad (4)$$

$$k = \frac{\pi}{2L} \left(\frac{t_{Mo}}{E_{Mo} I_{Mo}} - \frac{t_S}{E_S I_S} \right) \left/ \left(\frac{1}{E_{Mo} I_{Mo}} + \frac{1}{E_S I_S} \right) \right. .$$

由式(1)得

$$\frac{d\tau}{dx} = \frac{\pi}{L} \sum a_n n \cos \frac{n\pi x}{L}. \quad (5)$$

根据式(1)、(4)、(5)得

$$\sigma = \frac{kL}{\pi} \frac{d\tau}{dx}. \quad (6)$$

进一步推导出 σ, τ 的计算表达式过程较复杂, 详见文献[7]和[8], 这里给出结果公式

$$\tau = [c\pi \operatorname{sh}(\beta\pi x/L)/4\beta\gamma \operatorname{sh}\beta\pi] \sin\gamma\pi(1-x/L), \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{k\pi}{4\beta\gamma} \frac{\operatorname{sh}(\beta\pi x/L)}{\operatorname{sh}\beta\pi} [\beta \sin\gamma\pi(1-\frac{x}{L}) - \gamma \cos\gamma\pi(1-\frac{x}{L})]. \quad (8)$$

其中, C, β, γ 由样品的尺寸、弹性系数、热膨胀系数、温度来决定(参见附录). 我们结合 Si/Al/Mo 烧结的具体情况, 再进一步推导硅片边缘区域的应力分布表达式. 根据边界条件: $x=L$ 时, $N_s=0, Q_s=0$, 从式(2)、(7)、(8)推得

$$N_s = A_1 P(x) / [(\beta\pi/L)^2 + (\gamma\pi/L)^2] + A_2, \quad (9)$$

其中, $P(x) = \frac{\beta\pi}{L} \operatorname{ch} \frac{\beta\pi x}{L} \sin\gamma\pi(1-\frac{x}{L}) + \frac{\gamma\pi}{L} \operatorname{sh} \frac{\beta\pi x}{L} \cos\gamma\pi(1-\frac{x}{L})$, $A_1 = -cb\pi/4\beta\gamma \operatorname{sh}\beta\pi$, $A_2 = cbL/[4\beta(\beta^2+\gamma^2)]$,

$$Q_s = [-kcbL \operatorname{sh}(\beta\pi x/L)/4\beta\gamma \operatorname{sh}\beta\pi] \sin\gamma\pi(1-x/L) \quad (10)$$

$$M_s = (kL/\pi + t_s/2) N_s \quad (11)$$

由轴力和弯矩计算硅片中的正应力

$$\sigma_s = \frac{N_s}{bt_s} + \frac{M_s}{I_s} Z, \quad (12)$$

将式(11)代入(12), 得

$$\sigma_s = \{1/bt_s + Z[(kL/\pi + t_s/2)I_s]\} N_s. \quad (13)$$

由式(9)、(13)即可计算在硅片边缘区域的应力分布. 图 5 和 6 是根据式(7)、(8)、(12)绘出的在硅片边缘区域的层间应力 σ, τ 及 σ_s 的分布曲线. 计算中 $T=700^\circ\text{C}$, $T_0=20^\circ\text{C}$, $t_s=0.04\text{cm}$, $t_{Mo}=0.2\text{cm}$, $L=0.6\text{cm}$, $b=0.6\text{cm}$, $E_{Si}=1.689 \times 10^{12} \text{dyn/cm}^2$, $E_{Mo}=3.2 \times 10^{12} \text{dyn/cm}^2$, $\nu_{Si}=0.262$, $\nu_{Mo}=0.49$, $\alpha_{Si}=4.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\alpha_{Mo}=4.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

由图 5 可知, 层间应力 σ, τ 集中分布在端部大约 $3L/10$ ($\sim 0.2\text{cm}$) 的范围内, 在中间区域 ($x/L < 0.6$) 层间应力为零, 这与前面层间应力定性分析的情况一致. 从图 6 可知, 硅片中正应力 σ_s 的大小在边缘区域变化很大(内含等差线密集), 在端部大约 $3L/10$ 范围内, 在距界面同一高度 (z 相同) 处, 随离自由端边界 ($x/L=1$) 距离的增加, 应力值 σ_s 从零逐渐增至某一值, 即从边缘区域过渡到应力平行于表界面的中间区域, 且离界面距离愈近, 此值愈大 (在 $z=-0.02\text{cm}$ 硅片上表面为 $-4.36 \times 10^8 \text{dyn/cm}^2$, 在 $z=0$ 硅片中心面为 $-5.12 \times 10^8 \text{dyn/cm}^2$, 在 $z=0.02\text{cm}$ 界面处为 $-5.89 \times 10^8 \text{dyn/cm}^2$); 愈靠近自由边界, 高度 z 对应力 σ_s 影响愈小; 在边缘区域取同一个 σ_s (内含某等差线), 其 x 差别不大, 而 z 差别较大, 即表明等差线与表界面斜交.

一般样品中硅片处于三向受力状态. 本实验进光方向为 y 轴, 因此硅片中只有正应力 σ_x (即 σ_s)、 σ_z 及剪应力 τ_{xz}, τ_{zx} 产生光弹效应. 硅片厚度 (0.04cm) 远小于其 x 方向长度 (1.2cm), 根据 Taylor 的研究^[9], 可忽略硅片中正应力 σ_z 及剪应力 τ_{xz}, τ_{zx} 的作用, 即我们在实验中观测到的应力等差线条纹是硅片中沿进光方向各点上的正应力 σ_s 形成的光程差的累积结果. 因此, 由实验获得的光弹图 2 上各级次等差线条纹可求出对应的 σ_s 值, 如表 1.

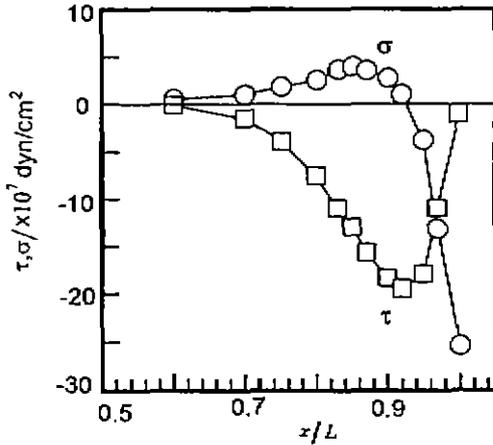


图5 样品边缘区域硅片与铜片界面上的层间应力

Fig. 5 Distribution of interlaminar stress at the interface between the Si wafer and Mo wafer at the edge of the sample

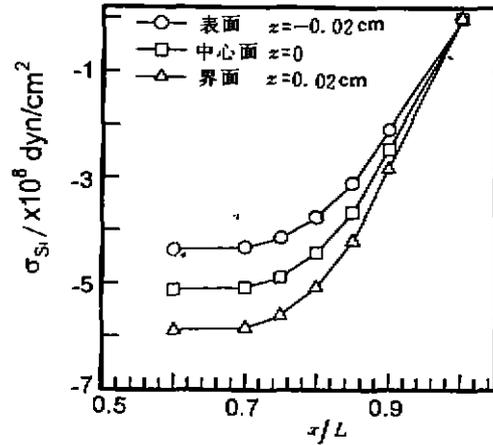


图6 硅片边缘区域应力分布
Fig. 6 Distribution of stress of silicon wafer at the edge

表1 各等差线对应的应力值

Table 1 Stress value corresponding to different isochromatic lines

等差线级数 n	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7
应力 σ_s ($\times 10^8 \text{ dyn/cm}^2$)	0	-1.20	-2.41	-3.60	-4.80	-6.04	-7.24	-8.45

对比实验图2和理论图6可知,在硅片边缘区域,理论计算和实验测量的应力分布规律一致,数量级相同.另外,我们测量了烧结条件对应力的影响,发现提高烧结温度,应力值增大,缩短烧结恒温时间,应力有减小的趋势.

附录

(1)在式(7)、(8)中, $\beta = [(\rho + \eta)/2]^{1/2}$, $\gamma = [(\rho - \eta)/2]^{1/2}$, 其中,

$$\rho^2 = \frac{\frac{2}{\pi^2} \left\{ \frac{1}{E_{Si}} \left[1 + \frac{3kL}{\pi t_{Si}} + \left(1 + \frac{KL}{\pi t_{Si}} \right) \right] + \frac{t_{Si}}{E_{Mo} t_{Mo}} \left[1 + \frac{3KL}{\pi t_{Mo}} \left(\frac{KL}{\pi t_{Mo}} - 1 \right) \right] \right\}}{\frac{t_{Si}^2 \pi^2}{70L^4} \left\{ \frac{1}{3} \left[\frac{1}{3} + \frac{KL}{\pi t_{Si}} \left(\frac{11}{3} + \frac{13kL}{\pi t_{Si}} \right) \right] + \frac{t_{Mo}^3}{E_{Mo} t_{Si}^3} \left[\frac{1}{3} + \frac{KL}{\pi t_{Mo}} \left(\frac{13KL}{\pi t_{Mo}} - \frac{11}{3} \right) \right] \right\}},$$

$$2\eta = \frac{\frac{1}{10G_{Si}} \left[\frac{2}{3} + \frac{kL}{\pi t_{Si}} \left(1 + \frac{6kL}{\pi t_{Si}} \right) \right] - \frac{\nu_{Si}}{5E_{Si}} \left[\frac{2}{3} + \frac{6kL}{\pi t_{Si}} \left(1 + \frac{kL}{\pi t_{Si}} \right) \right] + \frac{t_{Mo}}{10G_{Mo} t_{Si}} \left[\frac{2}{3} + \frac{kL}{\pi t_{Mo}} \left(\frac{6kL}{\pi t_{Mo}} - 1 \right) \right] + \frac{\nu_{Mo} t_{Mo}}{5E_{Mo} t_{Si}} \left[-\frac{2}{3} + \frac{6kL}{\pi t_{Mo}} \left(1 - \frac{kL}{\pi t_{Mo}} \right) \right]}{\frac{t_{Si}^2 \pi^2}{70L^2} \left\{ \frac{1}{E_{Si}} \left[\frac{1}{3} + \frac{kL}{\pi t_{Si}} \left(\frac{11}{3} + \frac{13KL}{\pi t_{Si}} \right) \right] + \frac{t_{Mo}^3}{E_{Mo} t_{Si}^3} \left[\frac{1}{3} + \frac{KL}{\pi t_{Mo}} \left(\frac{13KL}{\pi t_{Mo}} - \frac{11}{3} \right) \right] \right\}},$$

而 $G_{Si} = E_{Si}/2(1 + \nu_{Si})$, $G_{Mo} = E_{Mo}/2(1 + \nu_{Mo})$.

(2)式(7)、(8)中,

$$C = \frac{(\alpha_{Mo} - \alpha_{Si})(T_0 - T) \frac{t_{Si}}{L\pi} + \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{n} \cos n\pi \left\{ \frac{1}{E_{Si}} \left[1 + \frac{3kL}{\pi t_{Si}} \left(1 + \frac{kL}{\pi t_{Si}} \right) \right] + \frac{t_{Si}}{E_{Mo} t_{Mo}} \left[1 + \frac{3kL}{\pi t_{Mo}} \left(\frac{kL}{\pi t_{Mo}} - 1 \right) \right] \right\}}{\frac{t_{Si}^2 \pi^2}{70L^4} \left\{ \frac{1}{3} + \frac{kL}{\pi t_{Si}} \left[\frac{1}{3} + \frac{kL}{\pi t_{Si}} \left(\frac{11}{3} + \frac{13kL}{\pi t_{Si}} \right) \right] + \frac{t_{Mo}^3}{E_{Mo} t_{Si}^3} \left[\frac{1}{3} + \frac{kL}{\pi t_{Mo}} \left(\frac{13kL}{\pi t_{Mo}} - \frac{11}{3} \right) \right] \right\}}$$

REFERENCES

- 1 Kotake H, Shin Takasu. *J. Electrochem. Soc.*, 1980, **127**(1):179
- 2 ZHAO Shou-Nan, LIANG Han-Cheng, YIN Hong-Hui. *Chinese J. of Infrared and Millimeter Waves*, 1987, **6**(1):57
- 3 Hu S M. *J. Appl. Phys.*, 1991, **70**(6):1253
- 4 LIANG Han-Cheng, PAN Yong-Xiong, ZHAO Shou-Nan, et al. *J. Appl. Phys.*, 1992, **71**(6):2863
- 5 Wong S P, Huang L, Guo W S, et al. 1996 *Spring Meeting of MRS*, April 8~12, *MRS Symp. Proc.* 1996, 436
- 6 Principle and measurement of photoelasticity, Beijing: Science Press, (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, 85-183
- 7 ZHANG F F, *Interlaminar Stress of Composite material*, Beijing: Higher Education Publishing House (张福范. 复合材料层间应力, 北京: 高等教育出版社) 1993: 43~46
- 8 ZHANG F F. *Applied Mathematics and Mechanics* (张福范. 应用数学和力学) 1983, **4**(3): 347
- 9 Taylor T C, Yuan F L. *IRE Transactions on Electron Device*, 1962, ED-9303

INFRARED PHOTOELASTIC RESEARCH OF SINTERING STRESS
IN SILICON THYRISTOR*

PENG Hai-Jing ZHAO Shou-Nan

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

Abstract By referring to the theories of thermoelasticity and thermal interlaminar stress of composite, the stress in silicon wafer and the interlaminar stress of structure Si/Al/Mo used for making thyristor after sintering were analyzed. It was found that the distribution of stress caused by different properties of thermal expansion in the center portion is different from that at the edge of silicon wafer. The expression for stress at the edge of silicon wafer was derived. The stress photoelastic patterns were obtained by means of the infrared photoelastic system. The theory coincides well with the results of experiment.

Key words silicon, stress, sintering, photoelasticity, thyristor.

* The project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province of China
Received 1997-04-15, revised 1997-10-17