

## 参 考 文 献

- [1] Rinjiro Ando, *J. Phys. Soc. Japan*, **17**(1962), 937.  
 [2] Jiro Hiraishi et al., *J. Chem. Phys.*, **65** (1976),

3821.

- [3] M. Delfino et al., *J. Solid State Chemistry*, **31** (1980), 131.  
 [4] 孟庆安等, 科学通报, **24-22**(1979), 1016.

# 电阻法测定 Al-Si 合金膜电迁移激活能

罗 荣 芳 黄 绍 泉

(中国科学院上海冶金研究所)

1980年4月8日收到

## 一、引 言

铝膜中加入 1—3%Si, 能提高集成电路中铝布线的抗电迁移能力和防止使结短路的蚀坑形成。

Van Gurp<sup>[1]</sup>研究了含硅量分别为 0.3%和 1.8%、厚度为 0.5 $\mu\text{m}$  的 Al-Si 合金膜的电迁移激活能, 用平均失效时间方法求得电迁移激活能为 0.31—0.32eV, 与含硅量无关。Black<sup>[2]</sup>研究了含硅量为 0.79%, 1.9% 和 3%、厚度为 0.70—0.73 $\mu\text{m}$  用 0.8 $\mu\text{m}$  厚的磷硅玻璃覆盖的 Al-Si 膜的电迁移激活能, 其值为 0.54—0.55 eV, 也与含硅量无关。

本文用电阻法测定了 Al-Si 膜的电迁移激活能。结果表明, 激活能与膜厚有关。此外还结合扫描电镜观察, 讨论了扩散机构和失效模式。

## 二、实验方法与试样制备

研究薄膜电迁移的方法有平均失效时间法<sup>[3]</sup>、扫描电镜和透射电镜观察法<sup>[4]</sup>、电阻测定法<sup>[5,6]</sup>等。电阻测定法是一种快速测定技术。它能研究电迁移过程早

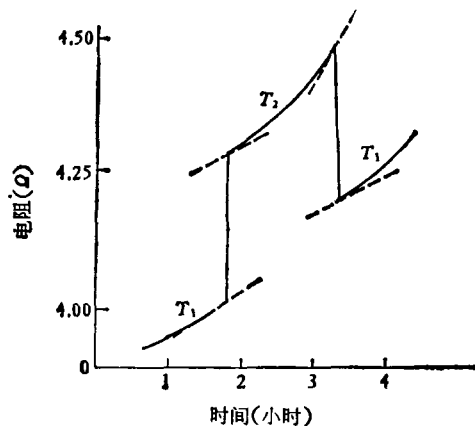


图 1 不同温度下试样电阻随时间变化

期阶段(孔洞形成前)所发生的变化。本实验是采用电阻测定法。电阻测定法主要是通过测定电阻的变化来求出电迁移激活能。

测定电阻的变化是根据文献[5]的方法。其原理是, 在恒定电流密度  $i$  和温度  $T$  下试样的电阻是时间的函数。如图 1 所示, 假定试样从温度  $T_1$  快速地转移到  $T_2$  时, 缺陷浓度保持不变, 则其斜率为

$$\dot{R}_1 = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \Big|_{T_1}$$

和

$$\dot{R}_2 = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \Big|_{T_2} \quad (1)$$

式中  $\dot{R}_1$  和  $\dot{R}_2$  分别为温度  $T_1$  和  $T_2$  下转移时刻的电阻随时间的变化率, 即斜率。将(1)式代入下式

$$\ln\left(\frac{\dot{R}_1}{\dot{R}_2}\right) = \Delta Q \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) / k, \quad (2)$$

即可求出电迁移激活能  $\Delta Q$ 。此法称为斜率比例法或变温法。

此外还可根据文献[6,7], 用电阻变化速度来表示电迁移时移动离子的平均漂移速度, 可导出等式

$$\ln\left(\frac{\Delta R}{R_0 t} \frac{T}{i}\right) = \ln\left(\frac{D_0 z^* e \rho}{k}\right) - \frac{\Delta Q}{kT}, \quad (3)$$

式中  $\Delta R/R_0$  为在时间间隔  $t$  内所发生的电阻变化,  $D_0$  为频率因子,  $\rho$  为薄膜电阻率,  $z^*e$  为离子的有效电荷,  $k$  为玻耳兹曼常数,  $i$  为电流密度,  $T$  为试验温度。在恒温、恒电流密度下测定电阻变化曲线, 由曲线直线部分求出  $\Delta R/R_0 t$ , 在不同温度下重复测定  $\Delta R/R_0 t$  值, 以  $\ln\left(\frac{\Delta R}{R_0 t} \frac{T}{i}\right)$  对  $1/T$  作图, 由此直线的斜率求出激活能  $\Delta Q$ , 此法称为恒温法。

本实验是用四探针法测定电阻。试验温度为  $(110-220) \pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

用真空度为  $10^{-3}$  托的电子束镀膜仪把 Al-Si 膜淀积在  $1\mu\text{m}$  厚的  $\text{SiO}_2$  衬底上。淀积速度  $64 \text{ \AA}/\text{分}$ , 衬底温度  $200^\circ\text{C}$ 。膜厚是用石英晶体振荡器监控, 并用双

光束干涉显微镜进行测定。Si含量是用钼蓝比色法测定。用标准光刻法制成心部尺寸为  $8 \times 250 \mu\text{m}^2$  的标准试样。然后在  $500^\circ\text{C}$  氮气炉中处理 5 分钟，心片用银浆粘在双列直插式陶瓷管壳上。用超声键合将直径为  $50 \mu\text{m}$  的 Al-1%Si 丝键合到扩大的条片端部上，作为通入电流和测定电压的引线。

### 三、试验结果与讨论

在电流密度  $j = 9 \times 10^3 \text{A/cm}^2$  和不同的试验温度条件下，测得条片电阻变化  $\Delta R/R_0$  与试验时间  $t$  的关系曲线如图 2 所示。曲线分为两个阶段：直线性地缓慢增加电阻的第一阶段和快速地变化电阻的第二阶段。由于 Al-Si 系统不同于 Al-Cu 系统，它未涉及到相变对电阻变化的影响。因此电阻缓慢增加是与电迁移时原子输送所引起的缺陷和条片厚度的小量变化有关。而电阻激烈的变化是与空位聚集或孔洞并最终导致条片的失效有关。在电阻测定的起始时刻，通常发现电阻的小量下降，这可能是与应力的消除或空位的消失等因素有关。

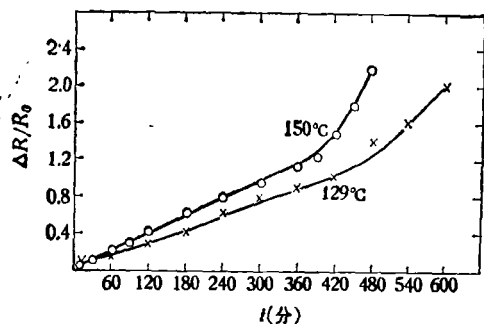


图 2 Al-Si 膜在不同温度下的电阻变化曲线 ( $j = 9 \times 10^3 \text{A/cm}^2$ , 膜的含 Si 量为 0.86%)

图 3 是按(3)式作出的  $\ln\left(\frac{\Delta R}{R_0} \cdot \frac{T}{j}\right)$  与  $1/T$  的关系图。由图中直线的斜率即可求出电迁移激活能。对厚度为  $0.42 \mu\text{m}$  (含 0.76% Si) 和  $0.46 \mu\text{m}$  (含 0.86% Si) 的薄膜，电迁移激活能为  $0.50-0.52 \text{eV}$ ，而对厚度为  $1.35 \mu\text{m}$  (含 Si 量为 0.68% 和 1.14%) 的厚膜，电迁移激活能为  $0.73-0.74 \text{eV}$ ，后者还表明在本研究的成分范围内，激活能与含硅量无关。

用斜率比例法在温度  $130-160^\circ\text{C}$  和  $180-214^\circ\text{C}$  下测得厚度为  $1.35 \mu\text{m}$  的厚膜 (含硅量为 0.68%) 和厚度为  $0.42 \mu\text{m}$  的薄膜 (含硅量为 0.76%) 的电迁移激活能分别为  $0.67 \text{eV}$  和  $0.51 \text{eV}$ 。

试验样品的扫描电镜观察表明，无论是薄的或厚的 Al-Si 膜，其失效模式都是孔洞或裂缝沿条片散乱地分布。这表明失效是由沿三叉晶界扩散的结构不均匀所引起。

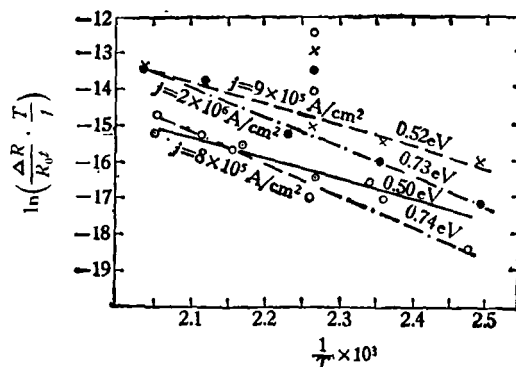


图 3  $\ln\left(\frac{\Delta R}{R_0} \cdot \frac{T}{j}\right)$  与  $1/T$  的关系图

- — 厚  $0.42 \mu\text{m}$  (0.76% Si);
- × — 厚  $0.46 \mu\text{m}$  (0.86% Si);
- — 厚  $1.35 \mu\text{m}$  (1.14% Si);
- — 厚  $1.35 \mu\text{m}$  (0.68% Si)

上述二种电阻测定方法所测得的电迁移激活能，都表明较厚的膜具有较高的激活能值。铝膜中大量电迁移试验表明，在  $250^\circ\text{C}$  以下电迁移激活能为  $0.6 \pm 0.2 \text{eV}$ ，此值与晶界扩散激活能相近。而在块状铝中测出的电迁移激活能为  $1.41 \pm 0.1 \text{eV}$ <sup>[8]</sup>，这与铝的自扩散激活能相当，通常固体中原子的运输是通过点缺陷、位错、晶界和表面而进行。其所需激活能依次递减。在薄的 Al-Si 膜中，电迁移激活能值较小，这可认为表面扩散起了一定的作用，因为这时单位体积的表面积较大。当然，薄的 Al-Si 膜的电迁移仍以晶界扩散为主，而对于厚膜的电迁移可能是沿位错和晶界进行，表面扩散起的作用较小。通常在面心立方金属中，自扩散是借助于空位机构进行的。空位是通过表面向内扩散或通过 Schottky 缺陷形成来产生。而较薄的膜，其单位体积的表面积较大，有利于缺陷密度的提高，从而使激活能降低。块状铝的电迁移激活能远大于薄膜的电迁移激活能，这一实验事实也表明薄膜的上述作用。

在电迁移过程中，Al-Si 膜的硅是否参与运输呢？文献[9]测出铝膜中硅的扩散激活能为  $0.9 \text{eV}$ ，表明本试验中硅不可能迁移。失效样品的扫描电镜观察，也未发现有硅颗粒的长大或减小的倾向。

### 参 考 文 献

- [1] G. J. van Gurp, *Appl. Phys. Lett.*, **19**(1971), 476.
- [2] J. R. Black, 16th Annual Proceedings IEEE Reliability Physics, (1978), 233.
- [3] J. R. Black, *IEEE Trans Electron Dev.*, **ED-16** (1969), 338
- [4] J. R. Devaney, *Scanning Electron Microscopy* (1970), *Proceeding of Third Annual Scanning Electron Microscope Symposium*, 417.

(下转第 454 页)