

# 退火温度对铝互连线热应力的影响<sup>\*</sup>

吴月花<sup>1,†</sup> 李志国<sup>1</sup> 刘志民<sup>2</sup> 吉元<sup>2</sup> 胡修振<sup>1</sup> 廖京宁<sup>1</sup>

(1 北京工业大学电控学院, 北京 100022)

(2 北京工业大学材料学院, 北京 100022)

**摘要:** 采用二维面探测器 X 射线衍射(XRD)测量 1 $\mu\text{m}$  和 0.5 $\mu\text{m}$  厚 Al 互连线退火前后的残余应力. 沉积态 Al 线均为拉应力, 且随膜厚的增加而减小. 沿长度方向的应力明显高于宽度方向的应力, 表面法线方向应力最小. 250 $^{\circ}\text{C}$  退火 2.5h 后, 互连线在各方向上的应力都减弱, 其中 1 $\mu\text{m}$  Al 线应力减弱幅度高于 0.5 $\mu\text{m}$  互连线. 采用电子背散射衍射(EBSD)方法, 测量退火前后 Al 互连线(111), (100), (110)取向晶粒的 IQ 值. 退火后平均 IQ 值提高, 互连线残余内应力随之减小. EBSD 分析结果与 XRD 应力测试结果相符合.

**关键词:** 二维面探测器 XRD; EBSD; 残余应力; IQ 值; 退火温度

EEACC: 2250A; 2570A

中图分类号: TN385

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)S0-0403-04

## 1 引言

随着集成电路的不断发展, 为了实现更高的速度和集成度, 器件的尺寸不断缩小, 互连线的特征尺寸也不断缩小, 互连线的结构越来越复杂, 90nm 以下的 Cu 和 Al 互连线已经商业化. 在芯片制造和使用的电、热过程中引入的应力是导致半导体器件失效的重要原因. 因此研究集成电路中的残余应力对提高器件的稳定性和可靠性具有十分重要的意义. 热应力是金属互连线、衬底、介质覆盖层之间由于热膨胀系数差异造成的, 应力使互连线产生空洞、晶须、小丘、裂缝及结构分层等缺陷.

人们通过不同的方法希望得到集成电路中各层膜的性质及形变来考察该热应力. 如晶片曲率法<sup>[1]</sup>, 面探测 X 射线衍射(XRD)<sup>[2]</sup>, 同步辐射 X 射线衍射法<sup>[3~5]</sup>, 透射电镜的会聚束电子衍射(TEM-CEBD)<sup>[6]</sup> 及以扫描探针显微镜为基础的扫描近场声成像方法(SNAM). 本文采用面探测 X 射线衍射仪测量了退火前后 Al 互连线的残余应力, 得出退火对残余应力的影响. 采用电子背散射衍射(EBSD)测试方法, 考察退火前后 Al 互连线(111), (100), (110)取向的晶粒的菊池衍射花样质量参数(IQ 值). 通过比较 IQ 统计值的变化, 评估退火前后单根 Al 互连线的微区应力变化.

## 2 实验

### 2.1 样品设计与制备

在 740 $^{\circ}\text{C}$  下, 采用热氧化法在 p 型(100)硅衬底上热生长 0.5 $\mu\text{m}$  厚的 SiO<sub>2</sub> 膜. 随后采用等离子增强化学汽相淀积(PECVD)法淀积 Al 膜. Al 膜厚度分别为 0.5 $\mu\text{m}$  和 1 $\mu\text{m}$ . 在淀积的同时通入 Ar 气. 最后用标准光刻法将 Al 膜光刻成 1mm 长, 2 $\mu\text{m}$  宽的线条.

### 2.2 测量方法及原理

#### 2.2.1 二维平面应力测量方法

采用侧倾  $\sin^2\psi$  法计算二维平面应力. 计算公式如下:

$$\sigma_{\varphi} = -\frac{1}{S_{44}} \cot\theta_0 \times \frac{\pi}{180} \times \frac{\partial(2\theta)_{\psi}}{\partial(\sin^2\psi)} \quad (1)$$

式中  $S_{44} = \frac{2(1+\nu)}{E}$ , 为弹性柔度.

由于 Al 薄膜互连线参与衍射的体积很小, 衍射强度很低, 特别是高指数晶面的衍射峰被背底淹没. 实验采用低入射角(19 $^{\circ}$ )测量(111)面, 减小了 X 射线的透入深度, 增加了衍射强度<sup>[7]</sup>.

#### 2.2.2 三维应力测量及计算

采用何氏法进行三位应力测量. 三维应力的测

<sup>\*</sup> 国防科技重点实验室资助项目

<sup>†</sup> 通信作者. Email: luckywyh@emails.bjut.edu.cn

2005-10-11 收到, 2006-01-13 定稿

试原理见图 1<sup>[2]</sup>. 衍射圆锥是通过  $\gamma$  和布拉格角  $2\theta$  来限制, 样品的运动是由三个旋转角  $\omega, \psi(\chi_g), \phi$  来控制.  $\chi_g$  和  $\psi$  有同一个旋转轴, 只是起始位置不同.  $\gamma$  角表示围绕入射线旋转的角度.

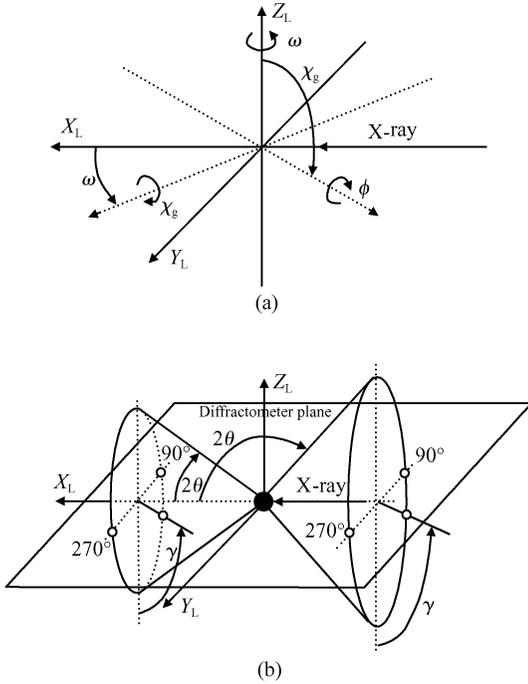


图 1 三维应力测试示意图 (a)  $X_L Y_L Z_L$  坐标系中的样品旋转; (b) 实验几何衍射圆锥

Fig.1 Schematic of testing three-dimensional stress

三维应力计算公式如下:

$$\begin{aligned}
 & f_{11}\epsilon_{11} + f_{12}\epsilon_{12} + f_{22}\epsilon_{22} + f_{13}\epsilon_{13} + \\
 & f_{23}\epsilon_{23} + f_{33}\epsilon_{33} = \ln \left| \frac{\sin\theta_0}{\sin\theta} \right| \\
 & f_{11} = h_1^2, f_{12} = 2h_1h_2, f_{22} = h_2^2, \\
 & f_{13} = 2h_1h_3, f_{23} = 2h_2h_3, f_{33} = h_3^2, \\
 & a = \sin\theta\cos\omega + \sin\gamma\cos\theta\sin\omega, \\
 & b = -\cos\gamma\cos\theta, \\
 & c = \sin\theta\sin\omega - \sin\gamma\cos\theta\cos\omega, \\
 & h_1 = a\cos\phi - b\cos\psi\sin\phi + c\sin\psi\sin\phi, \\
 & h_2 = a\sin\phi + b\cos\psi\cos\phi - c\sin\psi\cos\phi, \\
 & h_3 = b\sin\psi + c\cos\psi, \\
 & p_{11}\sigma_{11} + p_{12}\sigma_{12} + p_{22}\sigma_{22} + p_{13}\sigma_{13} + \\
 & p_{23}\sigma_{23} + p_{33}\sigma_{33} = \ln \left| \frac{\sin\theta_0}{\sin\theta} \right| \\
 & p_{ij} = \begin{cases} (1/E)[(1+\nu)f_{ij} - \nu] = \frac{1}{2}S_2f_{ij} + S_1, & i = j \\ (1/E)(1+\nu)f_{ij} = \frac{1}{2}S_2f_{ij}, & i \neq j \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

### 2.2.3 单根 Al 互连线的微区应力测量

$1\mu\text{m}$  厚的 Al 互连线, 在  $250, 300, 350^\circ\text{C}$  下退火 2.5h. 采用 EBSD 测试方法, 得出退火前后 Al 互连线(111), (100), (110)取向的晶粒的 IQ 值. 提取多晶材料中同一取向的 IQ 值进行比较, 可忽略晶体学取向对 IQ 值的影响, 用来评价薄膜的应变状态.

## 3 测试结果及分析

### 3.1 Al 互连线的残余平面应力分析

采用 XRD 得到互连线的残余平面应力测试结果如表 1 所示.  $0.5\mu\text{m}$  厚沉积态互连线应力值为  $244.2\text{MPa}$ ,  $250^\circ\text{C}$  退火 2.5h 处理后应力降到  $146.6\text{MPa}$ ;  $1\mu\text{m}$  厚沉积态互连线应力值为  $158.0\text{MPa}$ ,  $250^\circ\text{C}$  退火 2.5h 处理后应力降到  $68.0\text{MPa}$ . 由此可知, 互连线厚度增加, 残余应力减小, 退火处理可以削弱残余应力.

表 1 XRD 测量的互连线应力值

Table 1 Stress values of interconnects by XRD

互连线平面应力	$0.5\mu\text{m}$ 厚沉积态互连线	$0.5\mu\text{m}$ 厚互连线 ( $250^\circ\text{C}$ 退火 2.5h)	$1\mu\text{m}$ 厚沉积态互连线	$1\mu\text{m}$ 厚互连线 ( $250^\circ\text{C}$ 退火 2.5h)
$\sigma_e/\text{MPa}$	244.2	146.6	158.0	68.0

### 3.2 Al 互连线的三维残余应力分析

采用二维面探测器 XRD 测试了两种膜厚 Al 互连线在  $250^\circ\text{C}$  退火前后的三维应变及应力变化, 如表 2 所示. 沉积态互连线应力状态均为拉应力, 沿互连线长度方向应力值高于宽度方向的应力, 垂直互连线长度和宽度方向的应力值最小. 互连线三维应力的各向异性, 主要与制备 Al 膜的 PECVD 工艺有关. 其中长度方向应力大于宽度方向主要是由于当 Al 膜在高温下光刻成线条后冷却至低温 ( $< 100^\circ\text{C}$ ) 时, 塑性形变起主要作用, 应力释放后在互连线长度方向应力最大. 厚度方向应力最小, 是由于沉积 Al 膜时 Ar 离子轰击, 在 Al 膜中产生压应力, 与冷却后产生的热应力(拉应力)相抵消.

表 2 沉积态与  $250^\circ\text{C}$ , 2.5h 退火的  $0.5/1\mu\text{m}$  Al 互连线的三维应力

Table 2 Three-dimensional stresses of deposited and annealed  $0.5/1\mu\text{m}$  Al interconnects at  $250^\circ\text{C}$  for 2.5h

应力/MPa	$0.5\mu\text{m}$ 厚 Al 线		$1\mu\text{m}$ 厚 Al 线	
	沉积态	退火态	沉积态	退火态
$\sigma_x$	277.2	193.1	125	61.4
$\sigma_y$	234	137	106.1	54.1
$\sigma_z$	54.4	34.3	29.7	20.5
$\tau_{xy}$	12	20.5	9.5	3.8
$\tau_{xz}$	-91.4	-65.2	-47.5	-20.5
$\tau_{yz}$	79.8	46.3	37.6	16.8
静压力	188.6	121.5	87.3	45.4

0.5 $\mu\text{m}$ 厚互连线在各方向应力值都明显高于1 $\mu\text{m}$ 厚互连线应力.0.5 $\mu\text{m}$ 厚互连线静压力比1 $\mu\text{m}$ 厚互连线应力高2倍.退火后两种互连线的各方向应力都减弱,其中1 $\mu\text{m}$ 厚互连线应力减弱幅度高于0.5 $\mu\text{m}$ 厚互连线.这与互连线的高宽比有关:互连线越厚越有利于金属流动变形释放内应力,退火时再结晶长大的晶粒也越多,越易于消除内应力.

### 3.3 互连线的微区应力分析

由表3可知,沉积态Al线的平均IQ值在退火后明显增大,而且随着退火温度提高IQ值逐渐增大,说明互连线的残余内应力也随之逐渐减小.原因是退火使互连线的部分晶粒长大,退火温度越高再结晶长大越明显,残余内应力消除越明显.

表3 IQ<sub>(111)</sub>, IQ<sub>(100)</sub>和 IQ<sub>(110)</sub>比较

Table 3 Comparison of values of IQ<sub>(111)</sub>, IQ<sub>(100)</sub> and IQ<sub>(110)</sub>

平均 IQ 值	沉积态	250℃退火 2.5h	300℃退火 2.5h	350℃退火 2.5h
IQ <sub>(111)</sub>	27.5	31.6	35.6	37.3
IQ <sub>(100)</sub>	25.7	27.7	33.7	34.4
IQ <sub>(110)</sub>	25.4	28.3	34.0	32.4

相同样品条件下(111)取向晶粒的IQ值要大于(100)和(110)取向晶粒的IQ值.这与晶体在三种取向的弹性模量不同有关.在同一应力状态下,弹性模量大的(111)取向的应变小,导致IQ<sub>(111)</sub>值较大.350℃退火2.5h退火后,IQ<sub>(111)</sub>值明显高于IQ<sub>(100)</sub>和IQ<sub>(110)</sub>.其原因是互连线中的应变是非均匀应变,存在一定的应变梯度,退火后(111)取向增大明显,使得(111)方向上的应变梯度减小,从而IQ值增大.

## 4 结论

(1)残余应力测试结果表明互连线在长度、宽度、厚度方向上应力不同.沉积态的0.5 $\mu\text{m}$ Al和

1 $\mu\text{m}$ Al互连线的残余应力分别为244.2MPa和158.0MPa,均为拉应力,且随膜厚的增加而减小.Al互连线沿长度方向的应力明显高于宽度方向的应力,互连线表面法线方向的应力值则最小.250℃退火2.5h后,两种膜厚的Al互连线在各方向上的应力都减弱,其中1 $\mu\text{m}$ Al互连线应力减弱幅度高于0.5 $\mu\text{m}$ Al互连线.

(2)各取向的晶粒在300℃,2.5h退火后,平均IQ值提高.这表明,退火使晶格畸变减小,应力得到释放.退火后的IQ<sub>(111)</sub>明显大于IQ<sub>(100)</sub>和IQ<sub>(110)</sub>,这是由于晶体在不同取向的弹性模量不同,互连线中的应变是非均匀应变所致.EBSD分析结果与面探测器XRD和同步辐射XRD应力测试结果相符合.

## 参考文献

- [1] Yang Yintang. Stress investigation on semiconductor materials. *Microelectronics Technology*, 2000, 28(1): 38 (in Chinese)[杨银堂. 半导体器件材料应力性质的研究. 微电子技术, 2000, 28(1): 38]
- [2] He Baoping. Introduction to two-dimensional X-ray diffraction. *Powder Diffraction*, 2003, 18(2): 71
- [3] Wang P C, Cargill G S III, Noyan I C, et al. Electromigration-induced stress in aluminum conductor lines measured by X-ray microdiffraction. *Appl Phys Lett*, 1998, 72(11): 1296
- [4] Cargill G S III. Novel applications of X-ray analysis to microelectronic materials and devices. *Solid-State Electron*, 2002, 46: 1139
- [5] Hanabusa T, Kusaka K, Sakata O. Residual stress and thermal stress observation in thin copper films. *Thin Solid Films*, 2004, 459: 245
- [6] Kramer S, Mayer J, Witt C, et al. Analysis of local strain in aluminium interconnects by energy filtered CBED. *Ultramicroscopy*, 2000, 81: 245
- [7] Zhang Dingquan, He Jiawen. The analysis and influence of X-ray diffraction in residual stress. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1999: 156 (in Chinese)[张定铨, 何家文. 材料中残余应力的X射线衍射分析和作用. 西安: 西安交通大学出版社, 1999: 156]

## Relationship Between Annealing Temperature and Thermal Stress<sup>\*</sup>

Wu Yuehua<sup>1,†</sup>, Li Zhiguo<sup>1</sup>, Liu Zhimin<sup>2</sup>, Ji Yuan<sup>2</sup>, Hu Xiuzhen<sup>1</sup>, and Liao Jingning<sup>1</sup>

(1 *College of Electronic Information & Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China*)

(2 *College of Material Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China*)

**Abstract:** The residual strains and stresses of 1 $\mu$ m/0.5 $\mu$ m aluminum interconnects are observed by using two dimension XRD. The tensile stress of the deposited interconnects decreases with increasing interconnect width. The longitudinal stress is obvious lager than transverse stress. Stresses in every directions decrease after 2.5h annealing. The decreasing amplitude of 1 $\mu$ m-aluminum is much lager than that of 0.5 $\mu$ m. The image quality (IQ) of Kikuch is carried out by using EBSD fore-and-aft annealing. The result reveals that lattice distortion decreases by annealing, and the stress is released.

**Key words:** residual stress; annealing temperature; two-dimension XRD; EBSD; IQ

**EEACC:** 2250A; 2570A

**Article ID:** 0253-4177(2006)S0-0403-04

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Defense Technology Laboratory of China

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: luckywyh@emails.bjut.edu.cn

Received 11 October 2005, revised manuscript received 13 January 2006