

Al 互连线和 Cu 互连线的显微结构*

王俊忠^{1)†} 吉元¹⁾ 王晓冬³⁾ 刘志民¹⁾ 罗俊锋¹⁾ 李志国²⁾

1) 北京工业大学固体微结构与性能研究所, 北京 100022)

2) 北京工业大学电控学院, 北京 100022)

3) 中国人民武装警察部队学院基础部物理教研室, 廊坊 065000)

(2006 年 4 月 3 日收到, 2006 年 5 月 23 日收到修改稿)

利用电子背散射衍射(EBSD)技术,测量了由反应离子刻蚀工艺(RIE)制备的 Al 互连线和大马士革工艺(Damascene)制备的 Cu 互连线的显微结构,包括晶粒尺寸、晶体学取向和晶界特征.分析了 Cu 互连线线宽,及 Al 和 Cu 互连线退火工艺对互连线显微结构及电徙动失效的影响.

关键词:电子背散射衍射,互连线,显微结构,电徙动

PACC:6116D,6150J

1. 引言

随着电子器件和集成电路向着高集成度和高速方向发展,连接有源结构和各独立元件的金属互连线技术已从 2000 年以前的 $0.18\ \mu\text{m}$ 发展到当今的 $60\ \text{nm}$ 水平.IC 技术的更新换代也主要是以互连线的线条尺寸(特征尺寸)的缩小、硅片尺寸的增加,以及芯片集成度提高为标志的,而其中集成电路芯片特征尺寸为关键的标志^[1].不断缩小的互连线使得互连线在 IC 电路失效中所占比重高达 $2/3$,它的可靠性直接影响着超大规模集成电路(VLSI)和甚大规模集成电路(ULSI)器件的可靠性.互连线的显微结构,包括晶粒大小、晶体学取向、晶界类型及缺陷特征均受到芯片制备工艺的控制,又直接影响着互连线的可靠性^[2-4].

扫描电镜(SEM)只能用作样品形貌的观察,无法精确得到样品的晶体学信息^[5].透射电镜虽能得到样品的晶粒尺寸和取向信息,但制样比较繁琐.20 世纪 80 年代发展起来、配置在 SEM 中的衍射技术-电子背散射衍射(EBSD),很好地解决了这个问题.它特别适合对微小特征尺寸的样品进行晶体学分析,获得有关晶粒尺寸、晶粒取向及晶粒间取向差等统计信息^[4,6-8].EBSD 为 VLSI/ULSI 具有微米级至亚微米级特征尺寸晶体结构的分析提供了一种新型而

十分有效的分析方法.

本文采用 SEM-EBSD 技术,测试了 VLSI 的 Al 互连线和 ULSI 的 Cu 互连线的晶体学取向、晶粒特征和晶界特征,研究了互连线的微结构特征与制备工艺的关系,评价了微结构对互连线电徙动寿命和激活能的影响.

2. 实 验

测试用的 Cu 互连线采用大马士革工艺(Damascene)制成^[4].首先在 p 型(100)硅衬底上由热生长形成一层 $1\ \mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 层,通过等离子体干法在 SiO_2 上刻蚀出长度为 $400\ \mu\text{m}$,宽度分别为 $0.5\ \mu\text{m}$, $1\ \mu\text{m}$, $2\ \mu\text{m}$ 和 $4\ \mu\text{m}$ 的凹槽.然后采用磁控溅射法在凹槽中连续沉积 $5\ \text{nm}$ 厚的 Ta 阻挡层和 $50\ \text{nm}$ 厚的 Cu 晶种层.再采用电镀法使 Cu 充满凹槽.最后采用化学机械抛光法(CMP)除去表面多余的 Cu 和 Ta,得到沉积态 Cu 互连线.图 1 为大马士革 Cu 互连线的截面示意图.

测试用的 Al 互连线采用传统的反应离子刻蚀工艺(reactive ion etching,RIE)制成.首先在 p 型(100)硅衬底上热生长 SiO_2 层,通过 PECVD 法沉积 W 膜和 Al 膜,再光刻成 $2\ \mu\text{m}$ 宽、 $500\ \mu\text{m}$ 长的 Al 互连线(沉积态).Al 膜厚 $0.5\ \mu\text{m}$.图 2 为 Al 互连线的

* 国家自然科学基金(批准号 69936020)和军用模拟集成电路国防科技重点实验室基金(批准号 51439040203 QT0101)资助的课题.

† E-mail: wjznmn@emails.bjut.edu.cn

截面示意图.

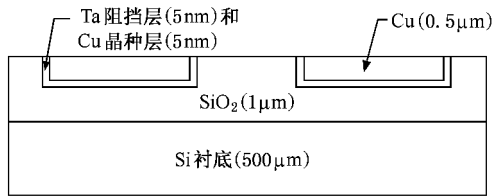


图 1 Cu 互连线截面示意图

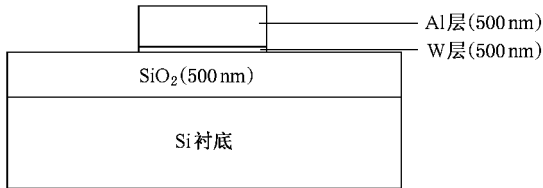


图 2 Al 互连线截面示意图

Al 互连线分别经过 250℃ 或 300℃ 或 350℃ 2.5 h 退火处理(退火态),Cu 互连线经过 300℃ 0.5 h 退火处理. Al 和 Cu 互连线分别在电流密度 1×10^7 A/cm² 和 2×10^6 A/cm², 温度 150℃ 条件下经过电徙动加速寿命实验, 求出互连线的中值失效寿命 (MTF) 和激活能 (Q_a). 实验结果表明, 退火使 Al 互连线和 Cu 互连线 MTF(h) 和 Q_a (eV) 均得到提高. 退火后 Cu 和 Al 互连线的 MTF 分别是沉积态的 1.43 倍和 1.22 倍, Q_a 数据见表 1.

表 1 2 μm 宽的 Cu 互连线和 2 μm 宽的 Al 互连线的激活能 Q_a

	状 态	Q_a /eV
Cu 互连线	沉积态	0.70 ± 0.01
	300℃ 退火	0.74 ± 0.026
Al 互连线	沉积态	0.53
	300℃ 退火	0.56

采用 EBSD 技术进行晶体学分析, 需要对样品表面进行抛光处理. Al 互连线表面经过离子减薄处理. Cu 互连线经过 CMP 工艺后, 即可得到适合 EBSD 晶体学分析的表面状态. 实验采用 JEOL 公司 JSM 6500F 热场发射扫描电镜 (TFE-SEM) 配备的 EDAX 公司的 EBSD 测试系统. 加速电压 30 kV, 入射束流 100 nA, EBSD 测量步进 70—100 nm, 采点数据在 1.5×10^4 — 5×10^4 之间, 由此可以获得 500—1100 个晶粒的统计信息. 作为对比, 我们还测试了与 Cu 互连线制备工艺相同的平坦 Cu 膜的晶粒结构.

3. 结果与讨论

3.1. 晶粒尺寸

图 3 和表 2 给出了由 EBSD 测试的 2 μm 宽的 Al 互连线和 Cu 互连线的晶粒取向图和晶粒尺寸统计数据. 比较沉积态的 Al 和 Cu 互连线可以看出, Al 互连线的晶粒尺寸为 100—200 nm, 见图 3(a)至(d), 及表 2. Al 互连线采用的 RIE 制备工艺有利于晶粒长大. 而采用大马士革工艺制备的 Cu 互连线的晶粒多为几十纳米, 并随着线宽的减小而进一步减小, 见图 3(e)和表 2. 这是由于大马士革结构的凹槽底部和侧壁对 Cu 膜产生了三维约束力, 抑制了 Cu 晶粒的生长. 平坦 Cu 膜的晶粒明显大于 Cu 互连线的晶粒也证明了这点.

比较沉积态和经过 250℃, 300℃, 350℃, 2.5 h 退火的 Al 互连线可以看出, 随着退火温度的增高, 晶粒逐渐长大 (EBSD 定义晶粒为取向均匀的单元, 图中不同灰度代表不同的晶粒), 如图 3(b)(c), (d) 和表 2 所示. 350℃ 退火后, Al 晶粒已呈近竹节结构, 即线宽小于晶粒尺寸, 晶粒长大约 1.7 倍. Cu 互

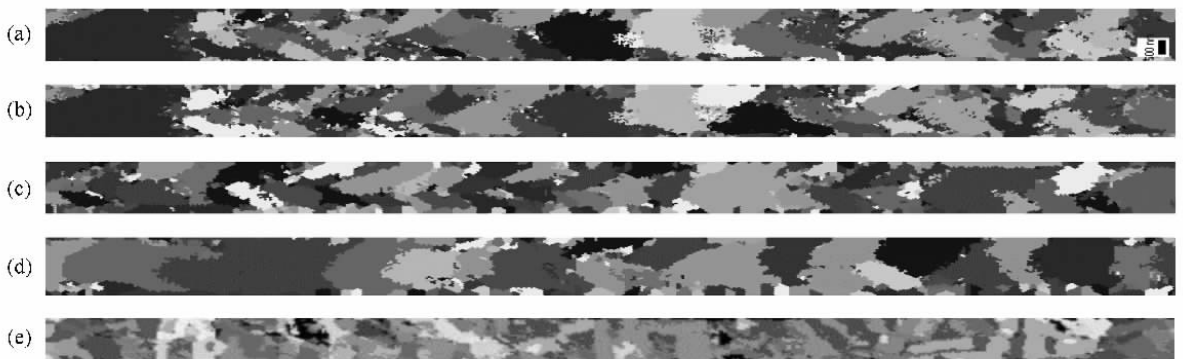


图 3 2 μm 宽 Al 互连线和 Cu 互连线的晶粒分布图 (a)(b)(c) 和 (d) 分别为沉积态, 250℃, 300℃ 和 350℃ 退火的 Al 互连线 (e) 为沉积态的 Cu 互连线

连线 300℃ 退火后,晶粒也有所增大,晶粒长大约 1.2—1.4 倍.晶粒长大和晶粒形成竹节结构,均有

利于抑制 Al 离子沿晶界的扩散,从而提高了互连线的电徙动失效中值寿命(MTF)和激活能(Q_a).

表 2 Cu 互连线、Cu 膜和 Al 互连线的平均晶粒尺寸

	Cu 互连线平均晶粒尺寸/nm				Cu 膜平均晶粒尺寸/nm	Al 互连线平均晶粒尺寸/nm
	0.5 μm	1 μm	2 μm	4 μm		
沉积态	30—40	50—60	60—70	80—90	200—300	120
200℃	-	-	-	-	400—500	-
250℃	-	-	-	-	-	200
退火态 300℃	40—60	-	-	90—110	-	180
350℃	-	-	-	-	-	200
450℃	-	-	-	-	800—1000	-

3.2. 晶体学取向

EBSD 所测的 2 μm 宽的互连线的极图和取向分布函数图(ODF)见图 4.沉积态的 Al 互连线具有很强的(111)织构,退火后(111)织构得到进一步的发展,如图 4(b)和(c)所示.而沉积态的 Cu 互连线具有很弱的(111)织构,如图 4(a)所示.退火后 Cu 的(111)织构也没有明显变化. Cu 互连线织构弱化也与大马士革的凹槽工艺密切相关:在平坦和较宽凹

槽中的金属膜主要受到二维应力,因此底表面控制晶粒生长和织构的发展,很容易得到沿表面法向的(111)织构膜.这是由 fcc 结构的金属膜中表面能最小化所决定的^[9-11].而在较窄的凹槽中,凹槽侧壁界面则可能成为控制晶粒生长和织构形成的重要因素,侧壁也成为(111)晶粒形核的主要位置,因此沿侧壁法向生长的(111)晶粒就会使沿底表面法向生长的(111)晶粒明显减少.

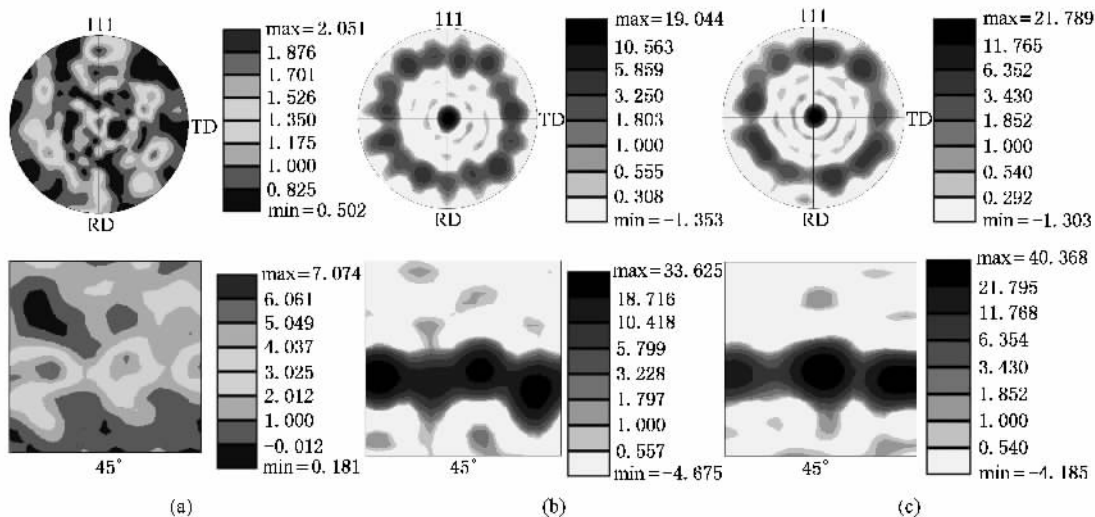


图 4 2 μm 互连线的极图和 ODF 函数:沉积态 Cu(a)和 Al 互连线(b);250℃退火的 Al 互连线(c)

3.3. 晶界类型

EBSD 对沉积态的 Cu 和 Al 互连线中重位点阵晶界(CSL)的统计数据见表 3.在 Cu 互连线中, Σ_1 晶界(0.5°—15°),即小角度晶界仅占 0.03%,而在 Al 互连线中, Σ_1 晶界高达 16.4%,并随着退火温度的升高还有所增加.在 Cu 互连线中, Σ_3 晶界(\approx

60°),即孪晶界高达 79.5%,而 Al 互连线中的 Σ_3 仅占 3%.孪晶界和小角度晶界均为低能构型的晶界,均有利于抑制金属离子的迁徙,提高互连线抗电徙动的能力^[12].在 Cu 膜的电镀过程中,很容易形成低层错能的孪晶界.如前所述,Cu 互连线的大马士革(凹槽)工艺限制了垂直于膜表面的(111)取向的晶粒发展,而大量形成的孪晶界也是使(111)织构弱化的

一个主要原因.由晶界的统计分析结果还可以知道,对于 Cu 互连线,Cu 膜界面能和应变能最小化可能对

晶粒的形核及生长起主要作用,而对于 Al 互连线,薄膜表面能最小化可促使(111)取向的晶粒择优发展.

表 3 Al 互连线和 Cu 互连线的重位点阵(CSL)晶界

	Cu 互连线		Al 互连线		
	沉积态	沉积态	退火态		
			250℃	300℃	350℃
$\Sigma_1/\%$	0.03	16.4	17.4	18.3	18.7
$\Sigma_3/\%$	79.1	3.2	4.5	5.9	3.6

4. 结 论

采用 EBSD 技术,测量了具有微米特征尺寸的 Cu 互连线和 Al 互连线的晶粒尺寸、晶粒取向和晶界类型,分析了互连线微结构与制备工艺的关系,及对互连线可靠性的影响.

1. Cu 互连线的大马士革凹槽结构限制了晶粒

长大和垂直于膜表面的(111)取向的晶粒发展,使得 Cu 互连线的晶粒尺寸和(111)织构强度明显小于相同工艺的平坦 Cu 膜,以及小于由传统 RIE 工艺制备的 Al 互连线的晶粒.

2. 退火使 Al 互连线和 Cu 互连线的晶粒尺寸、(111)织构,以及小角度晶界均得到发展,从而提高了 Al 互连线和 Cu 互连线电徙动的可靠性.

- [1] Wang Y Y, Kang J F 2002 *Chinese Journal of Semiconductor* **23** 1121 (in Chinese)[王阳元、康晋峰 2002 半导体学报 **23** 1121]
- [2] Greenebaum B, Sauter A I, Flinn P A, Nix W D 1991 *Appl. Phys. Lett.* **58** 1845
- [3] Kilijanski M S, Shen Y L 2002 *Microelectronics Reliability* **42** 259
- [4] Ji Y, Zhong T X, Li Z G, Wang X D, Luo D, Xia Y, Liu Z M 2004 *Microelectronic Engineering* **71** 182
- [5] Shen D H, Wu X F, Lu H, Froumin N, Polak M 2000 *Chin. Phys.* **9** 528
- [6] Dingley D J, Randle V 1992 *J. Mater. Sci.* **27** 4545
- [7] Gholinia A, Humphreys F J, Prangnell P B 2002 *Acta Materialia* **50**

4461

- [8] Dingley D J, Field D P 1997 *Mat. Sci. Tech.* **13** 69
- [9] Field D P, Nucci J A, Keller R R 1996 Proceedings of the 22nd International Symposium for Testing and Failure Analysis, 18-22 November 1996, Los Angeles, California, USA
- [10] Field D P, Muppidi T, Sanchez J E Jr 2003 *SCANNING* **25** 309
- [11] Zhang J M, Xu K W 2002 *Acta. Phys. Sin.* **51** 2562 (in Chinese)[张建民、徐可为 2002 物理学报 **51** 2562]
- [12] Field D P, Sanchez J E, Besser P R, Dingley D J 1997 *J. Appl. Phys.* **82** 2383

Microstructures of Al and Cu interconnects ^{*}

Wang Jun-Zhong^{1)†} Ji Yuan¹⁾ Wang Xiao-Dong³⁾ Liu Zhi-Min¹⁾ Luo Jun-Feng¹⁾ Li Zhi-Guo²⁾

1 *✉ Institute of Microstructure and Property of Advanced Materials , Beijing University of Technology (Beijing U Tech) , Beijing 100022 , China)*

2 *✉ Institute of Electronic Information & Control Engineering Beijing U Tech , Beijing 100022 , China)*

3 *✉ Physics Teaching & Research Section of Basic Department , The Chinese People 's Armed Police Forces Academy , Langfang 065000 , China)*

(Received 3 April 2006 ; revised manuscript received 23 May 2006)

Abstract

The electron backscatter diffraction technique (EBSD) has been used to measure the microstructure of reactive ion etched (RIE) Al and damascene Cu interconnects , including the grain size , grain orientation and grain boundary characteristics. Linewidths of Cu interconnects , as well as the anneal processes of Al and Cu interconnects impacting on the microstructures and causing the electromigration failure were analyzed.

Keywords : EBSD , interconnect , microstructure , electromigration

PACC : 6116D , 6150J

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69936020) and the Science and Technology Foundation of State Key Laboratory of Military Simulation Integrated Circuit (Grant No. 51439040203 QT0101).

[†] E-mail : wjznn@emails.bjut.edu.cn