第 21 卷第 9 期　　半　导　体　学　报　　Vol. 21, No. 9
2000 年 9 月　　CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTORS　　Sep., 2000

电迁移与工艺相关的关系

焦慧芳　孔学东

(信息产业部电子五所, 广州　510610)

贾新章　孙　青

(西安电子科技大学, 西安　710071)

扬　文　徐　征

(华晶电子集团公司中央研究所, 无锡　214035)

摘要: 针对金属化电迁移, 进行了失效机理与工艺相关性的研究; 确定了金属晶粒尺寸与金属化可靠性之间存在着直接关系. 金属平均晶粒直径与金属电迁移寿命受金属化溅射工艺条件的影响完全一致. 提出了平均晶粒直径作为能够表征金属化可靠性的特征工艺参数的概念和金属化可靠性在线评价方法.

关键词: 电迁移; 金属化; 可靠性; 数学分析

EEACC: 0170N; 0220

中图分类号: TN47　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 0253-4177(2000)09-0927-07

Relationship Between Electromigration and Process

JIAO Hui-fang, KONG Xue-dong

(*Information Industry Ministry, Electronics Institute No. 5, Guangzhou*　510610, *China*)

JIA Xin-zhang, SUN Qing

(*Xidian University, Xi'an*　710071, *China*)

YANG Wen and XU Zheng

(*Central Research Institute, China Huajing Electronics Group Corporation, Wuxi*　214035, *China*)

Received 25 April 1999, revised manuscript received 15 November 1999

Abstract: Some findings on electromigration of VLSI are presented. Studying the relationship between the electromigration and process, the dependence between the metallization reliability, and the grain size has been confirmed. A characteristic parameter, which can describe the metallization reliability, and an online

焦慧芳　女, 1966 年出生, 工程师, 从事微电子可靠性研究.

1999-04-25 收到, 1999-11-15 定稿

way to monitor the electromigration of VLSI are defined.

Key words: electromigration; metallization; reliability; mathematical analysis
EEACC: 0170N; 0220
Article ID: 0253-4177(2000)09-0927-07

1 引言

VLSI 已进入亚微米和深亚微米时代, 失效率已下降到 10FIT, 几乎不可能对其进行失效率的评估, 因此, 可靠性工程人员必须致力于开发与失效机理有关的在线工艺监测[1,2]. 开发合适的在线工艺监测手段的关键是: 研究失效机理与工艺的相关关系.

VLSI 几何尺寸的不断减小, 使得金属化电迁移成为 VLSI 最重要的失效机理之一[3]. 国际上有许多文献指出, 金属晶粒形状、尺寸及其分布是影响电迁移的重要因素[4—6]. Naoki Hoshino 等人的研究结果表明, 随着金属晶粒变小、晶界三相点增多, 导致电迁移寿命退化, 当晶粒尺寸较大而可能存在竹节结构时, 电迁移寿命突然改善. 本研究的结果与 Naoki Hoshino 的结果相符. 并通过金属化电迁移、晶粒结构与工艺的相关性研究, 提出了表征金属化可靠性的特征工艺参数和金属化可靠性在线评价方法.

2 实验

由国际同行的研究结果和生产线的实践经验可知, 金属化溅射对金属化互连系统的可靠性和金属晶粒结构有着直接的影响. 故决定对金属化溅射工序做工艺试验, 以研究金属化可靠性和金属晶粒结合与溅射工艺之间的相关性.

为了合理地安排试验, 假设溅射温度、溅射功率、腔体压强是三个独立的因素. 用正交试验法, 对溅射工艺进行了三因素三水平的工艺试验[7], 试验方案见表 1.

表 1 溅射工艺正交试验方案

Table 1 Orthogonal Test´s Scheme for Sputtering Technology

序号	A(温度/℃)	B(功率/%)	C(压强/Pa)
1	A1(50)	B1(75)	C1(0.789)
2	A1(50)	B2(80)	C2(0.931)
3	A1(50)	B3(85)	C3(1.064)
4	A2(200)	B1(75)	C2(0.931)
5	A2(200)	B2(80)	C3(1.064)
6	A2(200)	B3(85)	C1(0.798)
7	A3(350)	B1(75)	C3(1.064)
8	A3(350)	B2(80)	C1(0.798)
9	A3(350)	B3(85)	C2(0.931)

按照表 1, 生产出 9 片带有 SWEAT(Standard Wafer-Level Electromigration Acceleration Test) 结构的正片和 9 片仅做溅射的工艺陪片(为光片). 还专门做了一组只改变溅射温度的工艺试验, 共 3 片, 其温度分别为 100℃、200℃、300℃. 本研究所用金属化溅射设备为 Varian 3180 磁控溅射台.

3 实验结果

对工艺陪片, 做了详细的晶粒定量测试和统计分析; 对有 SWEAT 结构的正片进行了 SWEAT 试验和结果的统计分析; 对仅做了温度拉偏的样品, 进行了 SWEAT 试验和结果的统计分析.

3.1 晶粒结构的定量测试结果

晶粒结构的定量测试是用扫描电镜和装在其上的图像分析软件完成的. 测试了晶粒的平均直径、最大直径、取向角及其形状因子. 因晶粒形状不规则, 不同方向上测得的直径值是不同的. 为了全面地反映晶粒尺寸, 引入平均直径的概念, 它是从 0°~ 180°之间以 15°为步距进行测量的多个值的算术平均值. 形状因子提供关于晶粒圆度的信息, 若晶粒呈球形, 其形状因子为 1, 其余形状的形状因子都小于 1, 形状因子越小, 晶粒越细长. 形状因子的计算公式为: 形状因子= $4\pi\times$面积/周长^2. 晶粒的取向角是指晶粒最大直径与 X 轴之间的夹角[8]. 晶粒结构的定量测试和统计结果见表 2—4.

表 2　晶粒平均直径的统计结果汇总表

Table 2　Statistic Results for Average diameter of Crystallite

样品号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
均值/mm	96.14	98.48	109.47	1612.51	1546.83	1532.98	1710.58	2325.12	2458
最小值/mm	8.46	9.34	9.37	104.72	67.14	60.48	84.34	93.84	710.79
最大值/mm	204.96	230.48	248.18	5228.96	4105.78	3985.88	3561.28	5416.25	5449.8
中位值/mm	96.55	98.23	108.24	1410.66	1378.62	1323.65	1539.25	2325.06	2256.95
标准偏差	38.06	39.64	42.32	907.21	822.09	783.76	829.74	1257.46	1159.3

表 3　晶粒取向角的统计结果汇总表

Table 3　Statistic Results for Orientational Angle of Crystallite

样品号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
均值/(°)	62.92	77.59	72.38	84.86	74.32	73.51	73.5	63.82	77.7
最小值/(°)	0	0	0	1	0	1	0	1	0
最大值/(°)	179	179	179	178	177	177	177	178	179
中位值/(°)	44	73	53	89	54	58.5	63	50	59
标准偏差	51.89	55.87	59.91	63.12	62.46	59.28	56.69	57.75	58.17

表 4　晶粒的形状因子的统计结果汇总表

Table 4　Statistic Results for Form-Factor of Crystallite

样品号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
均值	0.68	0.74	0.69	0.58	0.6	0.61	0.60	0.64	0.64
最小值	0.2	0.36	0.21	0.24	0.19	0.20	0.22	0.18	0.29
最大值	0.94	0.96	0.92	0.86	0.86	0.86	0.82	0.85	0.89
中位值	0.7	0.77	0.72	0.60	0.61	0.62	0.64	0.66	0.64
标准偏差	0.14	0.12	0.13	0.16	0.16	0.14	0.14	0.14	0.15

从以上各表的统计结果可以看出, 平均晶粒直径越大, 晶粒的均匀性越差. 晶粒的取向角分布范围较大, 说明晶粒排列杂乱无章. 晶粒形状都比较相似, 形状因子的均值在 0.58—0.74 之间.

3.2　SWEAT 试验结果

SWEAT 试验试图施加恒定加速因子, 通过监测条温和电流密度来监测瞬时应力下的加速因子, 通过改变金属条上的电流密度, 以逐步逼近的方式将电流调大或调小来获得希望的加速因子, 也就是维持试验的加速因子在一定范围内不变.

本研究的 SWEAT 试验结果就是在相同的加速因子前提下, 对不同样品的电迁移寿命 TIF (Time to Fail) 测量结果及外推到预计使用条件的可靠性寿命. 试验时在每个样品上对多个结构进行了测量, 试验中使用的加速因子为 3.15×10^6. 表 5 是第二组正交试验和第三组温度拉偏试验样品的 SWEAT 试验失效时间 TTF 统计结果.

表 5　SWEAT 试验 TTF 统计结果汇总表

Table 5　Statistic Results of TTF for SWEAT Test

样品号	TTF 均值/s	TTF 中位值/s	TTF 标准偏差
W1	136.75	94	109.28
W2	151.83	62	200.60
W3	156.86	162	100.40
W4	297.21	146	299.72
W5	264.85	151	245.65
W6	295.28	256	201.76
W7	211.71	198	43.26
W8	338.67	305	216.46
Wt1	26.2	26	2.13
Wt2	121.75	125	21.99
Wt3	423.2	330	322.67

注: W1—W9 为正交试验样品, Wt1—Wt3 为温度拉偏试验样品.

4　结果分析

4.1　晶粒尺寸与工艺条件的相关性分析

用正交分析法对平均晶粒直径及其标准偏差、晶

粒的形状因子及其标准偏差、晶粒取向角均值及其标准偏差与溅射工艺条件之间进行了正交分析,结果见图 1—图 3.

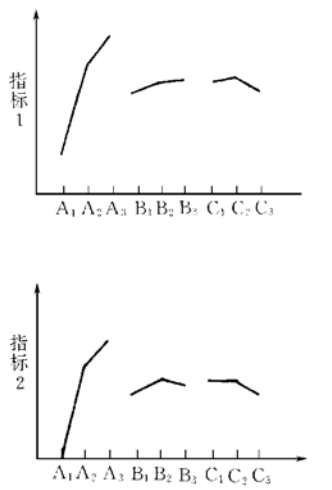
正交表

试验号		温度	功率	压强	指标 1	指标 2
1		1	1	1	96.14	38.06
2		1	2	2	98.48	39.64
3		1	3	3	109.47	42.32
4		2	1	2	1612.51	907.21
5		2	2	3	1546.83	822.09
6		2	3	1	1532.98	783.76
7		3	1	3	1710.58	829.74
8		3	2	1	2325.12	1257.46
9		3	3	2	2458.00	1159.30
指标 1	K1j	304.09	3419.2	3954.2		
	K2j	4692.3	3970.4	4168.9		
	K3j	6493.7	4100.4	3366.8		
	K'1j	101 36	1139.7	1318.0		
	K'2j	1564.1	1323.4	1389.6		
	K'3j	2164.5	1366.8	1122.2		
	R_j	2063.2	227.07	267.37		
指标 2	K1j	120.02	1775.0	2079.2		
	K2j	2513.0	2119.1	2106.1		
	K3j	3246.5	1985.3	1694.1		
	K'1j	40.01	591.67	693.09		
	K'2j	837.69	706.40	702.05		
	K'3j	1082.1	661.79	564.72		
		1042.1	114.73	8.96		

注:指标 1 是平均晶粒直径的均值。指标 2 是平均晶粒直径的标准偏差。

计算

结束



说明:A——温度　B——功率　C——压强

图 1　平均晶粒直径的均值及其分布与工艺条件之间的正交分析图

FIG.1　Orthogonal Analysis Between Average Value and Its Distribution of Crystallite and Process Conditions

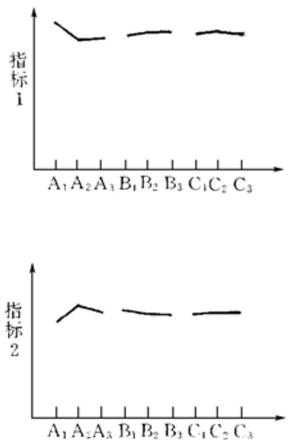
正交表

试验号		温度	功率	压强	指标 1	指标 2
1		1	1	1	0.68	0.14
2		1	2	2	0.74	0.12
3		1	3	3	0.69	0.13
4		2	1	2	0.58	0.16
5		2	2	3	0.60	0.16
6		2	3	1	0.61	0.14
7		3	1	3	0.60	0.14
8		3	2	1	0.60	0.14
9		3	3	2	0.64	0.15
指标 1	K1j	2.11	1.86	1.89		
	K2j	1.79	1.94	1.96		
	K3j	1.84	1.94	1.89		
	K'1j	0.70	0.62	0.63		
	K'2j	0.60	0.65	0.65		
	K'3j	0.61	0.65	0.63		
	R_j	0.11	0.03	0.02		
指标 2	K1j	0.39	0.44	0.42		
	K2j	0.46	0.42	0.43		
	K3j	0.43	0.42	0.43		
	K'1j	0.13	0.15	0.14		
		0.15	0.14	0.14		
	K'3j	0.14	0.14	0.14		
	R_j	0.02	0.00	0.00		

注:指标 1 是形状因子平均值,指标 2 是形状因子的标准偏差

计算

结束



说明:A——温度　B——功率　C——压强

图 2　晶粒形状因子的均值及其分布与工艺条件之间的正交分析图

FIG.2　Orthoganol Analysis Between Average Value and Its Distribution of Form-Factor of Crystallite and Process Conditions

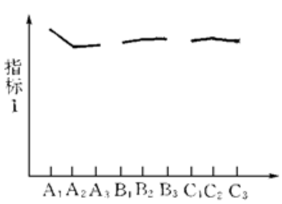
正交表

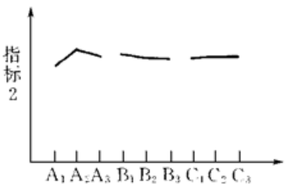
试验号		温度	功率	压强	指标 1	指标 2
1		1	1	1	0.68	0.14
2		1	2	2	0.74	0.12
3		1	3	3	0.69	0.13
4		2	1	2	0.58	0.16
5		2	2	3	0.60	0.16
6		2	3	1	0.61	0.14
7		3	1	3	0.60	0.14
8		3	2	1	0.60	0.14
9		3	3	2	0.64	0.15
指标 1	K1j	2.11	1.86	1.89		
	K2j	1.79	1.94	1.96		
	K3j	1.84	1.94	1.89		
	K′1j	0.70	0.62	0.63		
	K′2j	0.60	0.65	0.65		
	K′3j	0.61	0.65	0.63		
	R_j	0.11	0.03	0.02		
指标 2	K1j	0.39	0.44	0.42		
	K2j	0.46	0.42	0.43		
	K3j	0.43	0.42	0.43		
	K′1j	0.13	0.15	0.14		
		0.15	0.14	0.14		
	K′3j	0.14	0.14	0.14		
	R_j	0.02	0.00	0.00		

注：指标 1 是形状因子平均值，指标 2 是形状因子的标准偏差

计算

结束





说明：A——温度　B——功率　C——压强

图 3　晶粒取向角的均值及其分布与工艺条件之间的正交分析图

FIG. 3　Orthoganal Analysis Between Average Value and Its Distribution of Orientational Angles and Process Conditions

从图 1 可以看出, 平均晶粒直径受温度的影响最大, 它随温度的增加而增加; 而受功率和压强的影响要小一些, 它随功率的增加而增加, 中等压强时生成的晶粒尺寸最大. 可以得出 A3、B3、C2 即正交表中的第九个条件是生成最大晶粒的最佳条件.

从图 2 可以看出晶粒的形状因子对所拉偏的几个工艺条件都不十分敏感, 从晶粒形状因子的平均值及其分布的正交分析图发现, 温度对它们的影响要稍大一些. 温度越低, 晶粒的形状因子越大, 也就是说, 温度越低, 晶粒越趋于球型; 温度越高, 晶粒越细长. 温度处于 A2 时, 晶粒的形状因子的分布最不均匀.

从图 3 可以看出, 本试验所改变的几个工艺条件对这两个参数的影响不明显. 惟有温度对晶粒取向角的分布有相对强的影响, 当温度为 A2 时, 晶粒取向角的标准偏差最大, 也就是说晶粒的排列此时最为杂乱无章.

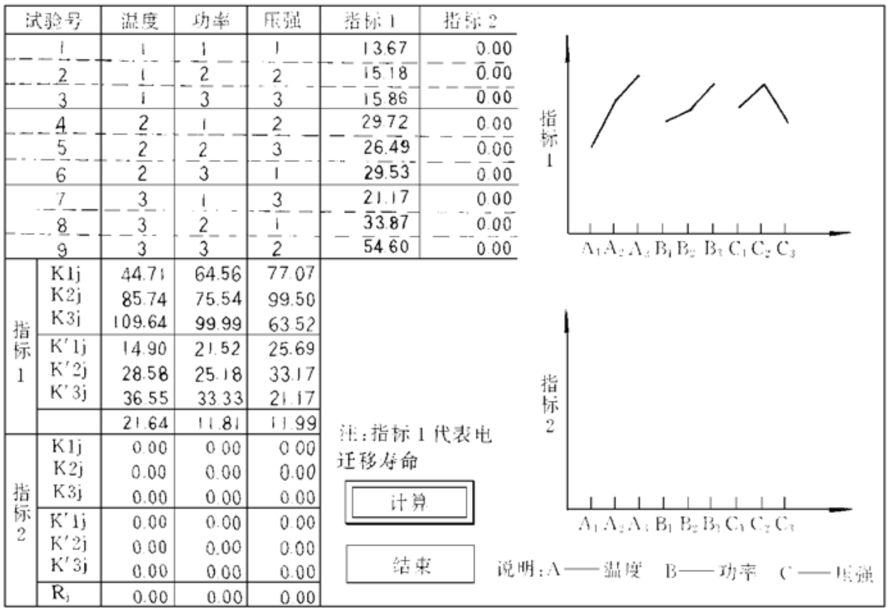
4.2　金属化电迁移寿命与工艺相关性分析

对正交试验样品的电迁移寿命与工艺试验条件之间进行正交分析, 结果见图 4. 从图 4 可以看出, 溅射温度、溅射功率、腔体压强是影响金属化电迁移寿命的敏感条件, 相对来说, 温度对金属化电迁移寿命的影响最大. 可得出可靠性最优化的溅射工艺条件为 A3、B3、C2.

对仅做温度拉偏样品的电迁移寿命与溅射温度之间进行了相关性分析, 发现溅射温度对电迁移的寿命影响很大, 且对电迁移寿命的影响趋势与正交试验的结果一致, 都是电迁移寿命随溅射温度的升高而增加. 金属化电迁移寿命与溅射温度的关系见图 5.

4.3　综合分析

将晶粒尺寸、电迁移寿命与工艺相关性进行综合分析, 对比上面的正交分析图发现, 图 4 与图 1 溅射工艺条件对金属化电迁移寿命的影响与对平均晶粒直径均值的影响趋势极为相似. 溅射温度越高, 晶粒尺寸越大, 金属的电迁移寿命越长. 溅射功率越大, 晶粒尺寸越大, 金属的电迁移寿命越长. 腔体压强取中间值时, 晶粒尺寸最大, 电迁移寿命也最长. 也就是说, 生成晶粒尺寸最大的溅射工艺条件与可靠性最优的工艺条件一致, 为 A3、B3、C2.



正交表

试验号	温度	功率	压强	指标1	指标2
1	1	1	1	13.67	0.00
2	1	2	2	15.18	0.00
3	1	3	3	15.86	0.00
4	2	1	2	29.72	0.00
5	2	2	3	26.49	0.00
6	2	3	1	29.53	0.00
7	3	1	3	21.17	0.00
8	3	2	1	33.87	0.00
9	3	3	2	54.60	0.00
指标1 K1j	44.71	64.56	77.07		
指标1 K2j	85.74	75.54	99.50		
指标1 K3j	109.64	99.99	63.52		
指标1 K'1j	14.90	21.52	25.69		
指标1 K'2j	28.58	25.18	33.17		
指标1 K'3j	36.55	33.33	21.17		
指标1	21.64	11.81	11.99		
指标2 K1j	0.00	0.00	0.00		
指标2 K2j	0.00	0.00	0.00		
指标2 K3j	0.00	0.00	0.00		
指标2 K'1j	0.00	0.00	0.00		
指标2 K'2j	0.00	0.00	0.00		
指标2 K'3j	0.00	0.00	0.00		
R_j	0.00	0.00	0.00		

图4 金属化电迁移寿命与工艺条件之间正交分析图

注: 图中的电迁移寿命是由试验的加速因子外推的试验寿命.

FIG. 4 Orthogonal Analysis Between Lifetime of Metal Electromigration and Process Condition

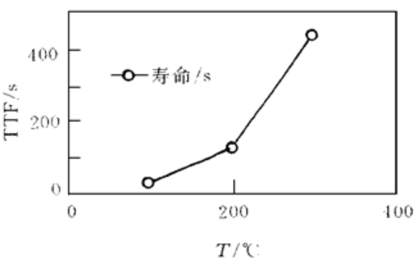


图5 电迁移寿命与溅射温度的关系图

FIG. 5 Lifetime of Electromigration vs Sputtering Temperative

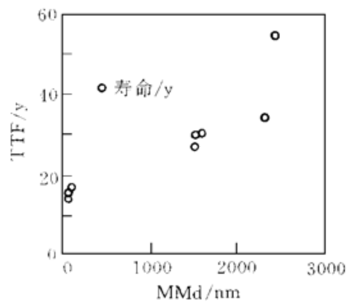


图6 电迁移寿命平均与晶粒直径均值相关关系图

注: 图中寿命是按加速因子为 3.15×10^{6} 外推出的预计使用条件的寿命

FIG. 6 Lifetime of Electromigration vs Average Diameter Value of Crystallite

将晶粒尺寸与金属化电迁移寿命进行相关分析, 结果见图 6.

从图 6 可以看出, 金属化电迁移寿命的总体趋势是随平均晶粒直径均值的增加而增加, 这与众所周知的结果相符合[5].

5 结论

本文针对 VLSI 的主要失效机理之一"金属化电迁移",通过失效机理与工艺相关性的研究,得出如下结论: ①金属化溅射工艺的溅射温度、溅射功率、腔体压强是金属化晶粒结构和其电迁移寿命的敏感条件,其中溅射温度对二者的影响尤为显著. ②本研究中金属化溅射工艺的可靠性优化的工艺条件是 A3、B3、C2. ③溅射温度、功率、压强对金属化电迁移寿命的影响趋势与对金属平均晶粒直径均值的影响趋势完全一致,故平均晶粒直径的均值可以作为金属化电迁移的可靠性特征参数. ④金属化可靠性的在线评价,可以通过在线定量评价金属晶粒结构来实现.

参 考 文 献

[1] D. L. Crook, "Evaluation of VLST Reliability Engineering", Proc. IRPS 90, 2—11.

[2] H. A. Schafft, D. A. Baglee, P. E. Kennedy, "Building-In Reliability: Making It Work," Proc. IRPS 1991, 1—16.

[3] Fausto Fantinl. Microelectron Reliab., 1984, **24**(2): 275—296.

[4] Naoki Hoshino *et al.*, "A Study of Degradation Mechanism of Electromigration Lifetime", ISRM, Toyo, 90, 112—1117, 1990.

[5] J. T. Yue, W. P. Funsten, R. V. Taylor, "Stress Induced Voids in Aluminum Interconnects During IC Processing", IEEE/IRPS, 85, 126—137.

[6] P. Merchant *et al.*, "Comparative Electromigration Tests of Al-Cu Alloys", IEEE/IRPS, 84, 256—263.

[7] 中国科学院数学研究所统计组编, 方差分析, 北京: 科学出版社, 1977, 第三章.

[8] 焦慧芳等, 可靠性与环境, 1998, 6 期, 20—23[JIAO Huifang *et al.*, Reliability and Environment, 1998, No. 6, 20—23(in Chinese)].

[9] D. P. Field, D. J. Dingley, M. M. Nowell, "Analysis of Grain Boundary Structure in Aluminum Thin films by Orientation Imaging Microscopy", ISTFA'95, 49—54.

[10] Jon Klema *et al.*, "Reliability Implication of Nitrogen Contamination During Deposition of Sputtered Aluminum/Silicon Metal Films", IEEE/IRPS, 84, 1—5.

[11] In-Seok Yeo and Paul A. Ho, "Stress Relaxation and Microstructure Change in Passivated AL(VU) Lines", 1996 IEEE, 131—138.

[12] L. Yau, C. Hong and D. Crook, "Passivation Material and Thickness Defects on The MTTF of Al-Si Metallization", IEEE/IRPS, 85, 115—118.