

VLSI 金属化布线电徙动动力学 温度相关性研究*

李志国 郭伟玲 朱 红 吉 元 程尧海 孙英华 张万荣

(北京工业大学电子工程系 北京 100022)

摘要 电徙动失效是 VLSI 金属化系统的主要失效形式。本文提出了一种新型 TiW 膜自加热结构, 产生沿金属化条长方向的温度梯度。文中采用分别独立的的试验和测温金属条结构, 利用电阻与温度间的线性关系精确确定金属条上的温度分布, 首次从理论和实验上深入研究了电徙动失效与温度梯度间的动力学关系。实验结果表明, 在 20~ 35 的温度梯度作用下, 电徙动平均失效时间、空洞失效位置和电徙动电阻变化呈现新的特性。

EEACC: 2570, 7320R; PACC: 6610, 6630Q

1 引言

随着现代 VLSI 器件尺寸逐渐向微米、亚微米方向发展, 器件可靠性问题日益突出。金属化电徙动失效一直是 VLSI 的主要失效模式。国外统计数据表明, 金属化电徙动失效占 VLSI 总失效率的 1/3~ 2/3。电徙动失效已经成为抑制 VLSI 性能和可靠性水平提高的首要问题, 因此也成为国内外 VLSI 可靠性研究的热点。

所谓电徙动是指在较高的电流密度下(通常为 $10^5 \text{A}/\text{cm}^2$ 以上)金属离子与电子相互作用(称为电子风力)而导致出现的离子质量输运。其最终失效表现为金属离子在金属条一端堆积, 另一端耗尽而出现短路或开路失效。离子流散度是导致出现净离子质量流的直接原因, 而离子流散度又是由于金属条内存在电流密度梯度、结构梯度和温度梯度所致。目前对电流及结构梯度对电徙动失效的研究文章已有多篇见诸报道^[1], 而温度梯度对电徙动失效的研究尚不多见^[2]。

2 电阻测温法

要研究温度梯度对电徙动的影响, 就必须解决金属化条上的测温问题, 我们首次采用简

* 国家和北京市自然科学基金资助项目

李志国 男, 1940 年出生, 教授, 现从事微电子器件可靠性研究与教学工作

郭伟玲 女, 1966 年出生, 讲师, 现从事微电子器件可靠性研究与教学工作

朱 红 男, 1972 年出生, 硕士生, 课题方向为 VLSI 金属化电徙动研究

1997-03-28 收到, 1997-08-20 定稿

简单易行且有较高精度的电阻测温法 与 Masaroni Sakimoto 等人提出的光致发光法^[3]相比,电阻测温简单方便,且具有很好的实际应用前景

实验样品为多层金属化结构 Si 片上热氧化得到 600nm 的 SiO₂, 溅射 300nm 的 TiW 合金膜用作自加热的热源, CVD 低温淀积 300nm 的致密 SiO₂ 层用作上下层间的绝缘层, 再后是磁控溅射 800nm 的 Al-1% Si-4% Cu 薄膜, 刻蚀出线宽为 3μm 测温条和实验条图形, 分别用以测温和进行加速应力寿命实验 最后是 200nm 的 SiO₂ 钝化层 样品版图如图 1 所示, 虚线为掩埋 TiW 合金膜

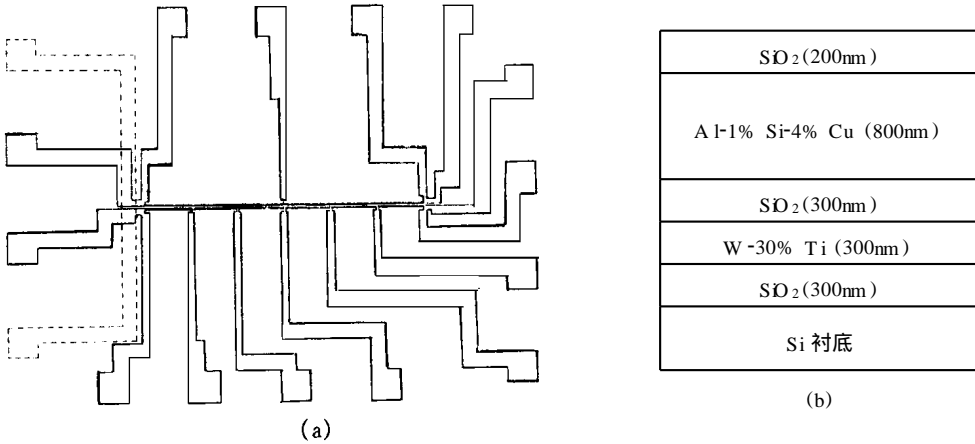


图 1 实验样品版图

(a) 样品俯视图, (b) 样品剖面图

理论表明, 体电阻在一定温度范围内其电阻率与温度存在线性关系, 结合欧姆定律,

$$R_T = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \tag{1}$$

式中 R_T, R_0 分别为温度 T, T_0 时的电阻值; α 为电阻温度系数 依此关系式, 通过测定不同标准温度下的电阻值, 即可得到 $R-T$ 数据对, 经线性回归处理, 得到 $R-T$ 线性关系(即求得 α)。利用得到的 $R-T$ 线性关系在实验中监测各段测温电阻的值, 即可换算得到金属条上各段电阻上的温度值 表 1 列出了测量得到的数据

为验证电阻测温法的可信性和精度, 我们分别用标准温箱恒温 and 红外微热像仪验证了电阻法测得的实验数值(如图 2)。

表 1 测温条各段电阻的初始值和电阻率温度系数

电阻编号	电阻初始值/ Ω	电阻率温度系数/ $10^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
R (1)	2 262023	4 052859
R (2)	2 119631	4 057582
R (3)	2 129236	4 052598
R (4)	2 112483	4 064653
R (5)	2 101624	4 064283
R (6)	2 062723	4 039581

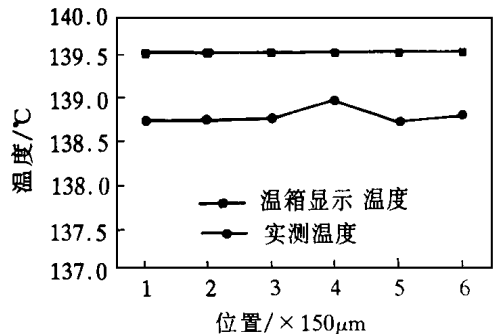


图 2 标准温箱恒温验证情况

3 样品传热状况理论分析

为实现所需要的温度梯度, 提供样品结构设计的理论依据 我们针对样品结构, 建立了热传导模型 样品剖面结构如图 3 所示 由于衬底为 Si 材料, 其厚度需处理成 SiO₂ 的等效厚度, 如图中虚线所示

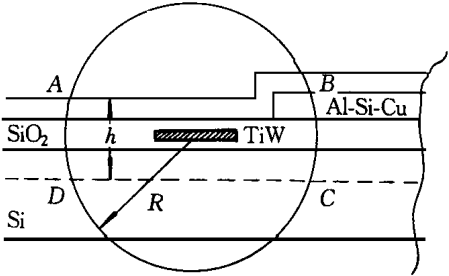


图 3 样品剖面结构示意图

根据傅立叶方程,

$$\frac{dT}{dx} = - \frac{j}{k} = - \frac{Q}{ks} \quad (2)$$

式中 Q 为热流; j 为热流密度; S 为传热面积; k 为热导率 考虑图 3 的实际样品结构, R 为图中圆半径, 样品纵向尺寸远小于横向尺寸, 当 $R \gg h$ (图 3 中) 时, 其传热截面已经不是通常的球面而是沿纵向

截去两个球冠后剩下的鼓形立体表面积 由于采用薄膜加热, $R \gg h$, 近似处理鼓形表面积为圆柱的表面积, 则

$$S = 2\pi R^2 + 2\pi R h \quad (3)$$

这里又一次用球面半径 R 近似取代上表面圆 AB 的半径, 由于 R 远大于球心至圆 AB 的距离, 上述近似显然成立 将式(3)代入式(2), 得

$$dT = - \frac{Q}{k(2\pi R^2 + 2\pi R h)} dx \quad (4)$$

积分得到,

$$T = k \ln\left(1 + \frac{h}{x}\right) + T_c \quad (5)$$

式中 k 为与发热效率和传导材料有关的常数; T_c 为 x 时的 T 值, 实际条件下理解为样品结构的边界温度 式(5)即为最终的样品条热分布形式, 它表明实验 Al-Si-Cu 金属条上的温度分布按对数规律递减, 其具体形式与常数 k 和样品纵横向相对尺寸等因素有关 按实测边界温度确定方程的具体形式, 理论曲线和实测值对照示于图 4 从图中可以看出, 理论曲线基本反映了实验条上的温度分布, 且温度梯度集中出现在靠近热源一端(如当实验条起始处 $R = 5h$ 时, $R = 25h$ 处, $T - T_c$ 已下降至 $T - T_c \Big|_{R=5h}$ 时的 78.5%), 这为样品的结构尺寸设计指明了方向

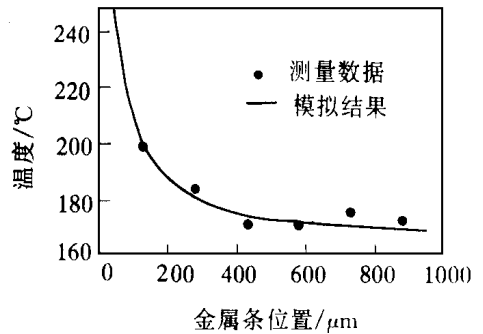


图 4 模拟曲线和实测温度对照图

4 实验结果及分析

4.1 实验条件

我们对样品进行了不同温度及梯度条件下的加速应力寿命实验 为更清楚地观察样品电徙动各段电阻变化情况和失效位置而专门设计, 测温条被分成六段, 实验条被分成二段

实验应力条件为:

电流密度 $j = 1.67 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$, 环境温度 $T_c = 40$, 自加热温度: 200, 140.

对每个温度点进行了正向温度梯度、逆向温度梯度条件和无温度梯度三类加速应力寿命实验。所谓正向温度梯度条件是指温度梯度方向(由高温指向低温方向)与电子流方向一致的情况, 逆向温度梯度则定义相反。

4.2 加速寿命实验平均失效时间数据结果及分析

样品不同温度条件下的寿命数据结果示于表 2(每组实验采集 5 个数据点)。

表 2 样品不同温度条件下的寿命试验结果

电流密度/ $(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	基准温度/ $^{\circ}\text{C}$	$\nabla T / ^{\circ}\text{C}$	温度梯度方向	平均失效时间/ min
1.67×10^6	140	20	正向	426.5
			逆向	478.5
			温箱恒温	468.5
	200	35	正向	76.5
			逆向	98.7
			温箱恒温	69.2

分析表中数据可以看出, 温度梯度的不同取向可以显著改善金属条的电徙动平均失效时间, 如样品在 25 $^{\circ}\text{C}$ 温度梯度作用由正向改为逆向时, 其平均失效时间提高了 213%。这可以从电子风力作用与温度梯度作用下的热扩散间的相互作用来解释。如经典电徙动理论描述的那样, 电子风力将金属离子“吹向”阳极, 而正向温度梯度作用下的热扩散离子流也驱使金属离子流向阳极, 加剧了离子的质量输运过程。逆向温度梯度则驱动反方向的热扩散离子流, 部分抵消了电子风力导致的质量迁徙流, 抑制空洞的形成扩展, 使电徙动平均失效时间增加。理论分析表明, 电徙动平均失效时间与离子流散度倒数成正比关系^[3]:

$$\text{MTF} \propto \frac{1}{\nabla J} \quad (6)$$

离子流散度与结构和温度梯度间的关系表示为:

$$\nabla J = J \left(\frac{1}{B} \nabla B + \frac{Q}{kT^2} \nabla T \right) \quad (7)$$

式中 J 为离子流大小; B 表示与结构有关的参数。由式(6)、(7)可以得到:

$$\frac{1}{\text{MTF}} = AJ \left(\frac{1}{B} \nabla B + \frac{Q}{kT^2} \nabla T \right) \quad (8)$$

式中 A 为比例常数, 对相同制备条件下得到的样品来说是确定的常数。显然正向温度梯度、逆向温度梯度和无温度梯度时的电徙动平均失效时间的变化规律与实验结果一致。

4.3 不同方向温度梯度作用下失效位置分析

我们采用分段电阻监测法, 逐一监测了电徙动开路失效的具体位置。失效位置定性反映了热应力引起的热、电两种迁徙流的相互作用结果, 表明最终样品失效主要由何种迁徙流造成。表 3 列出实验记录统计结果(每组实验采集 5 个数据点)。

表 3 样品不同温度条件下失效位置分布统计

样品结构	基准温度/	温度梯度方向	电子流方向	失效位置及所占比例	
				R (1)	R (2)
R (1)	140	温箱恒温			100%
				100%	
				60%	40%
R (2)	200	温箱恒温		20%	80%
				100%	
				100%	

表中统计数据清楚地表明,正向温度梯度造成的热扩散离子流与电子风力造成的离子迁徙流同向,加剧了空洞在阴极的形成和扩展,空洞开路失效一致地出现在阴极端.逆向温度梯度驱动的离子流在一定程度上复合了电子风力产生的空洞,抑制空洞的扩展,甚至在较大的温度梯度作用下,将空洞的形成位置“推向”阳极,即此时热迁徙流的大小超过了电迁徙流.这一现象清楚地揭示了热电迁徙的本质.可以预言,适当匹配的电流密度和温度梯度可以实现热扩散离子流和电迁徙流间的平衡,极大地提高金属化条的电徙动寿命.这在VLSI和功率集成电路的设计和应用中具有重要的现实意义.

SEM 显微分析清楚地观察到了位于金属条中部和阳极端的空洞.进一步证实了上述结论的正确性.

4.4 逆向温度梯度作用下电徙动电阻变化规律

电徙动电阻变化规律的研究一直是电徙动研究的重要方法之一,它动态地反映了电徙

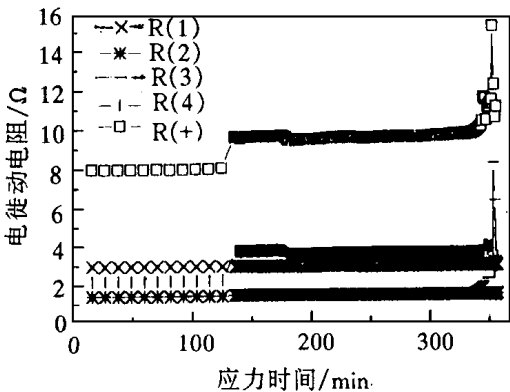


图 5 逆向温度梯度下“新平衡现象”电阻变化曲线

动发生发展的全过程.实验发现,无温度梯度、正向温度梯度条件下电徙动电阻变化仍遵循一般的变化规律,即电阻值长时间恒定,然后快速增加直至失效,只是正向温度梯度加剧了电徙动电阻的增加过程.在逆向温度梯度条件下,我们首次发现了电徙动电阻变化过程中出现的“新平衡现象”,即电阻在增加至 25% 乃至更高时仍能维持很长一段时间的平衡稳定,这段时间完全可以与电阻急剧变化前稳定的时间相比拟.“新平衡现象”示于图 5.

“新平衡现象”表明金属离子在薄膜内的运动在逆向温度梯度的作用下出现了新的平衡能

力.空洞的扩展与复合是一个动态的平衡过程,逆向温度梯度的作用正是在这种动态的平衡过程中局部抵消电迁徙离子流,抑制空洞的扩展,使电徙动电阻增加延缓,电徙动平均失效时间延长.“新平衡现象”动态直观地反映逆向温度梯度驱动的热扩散离子流的作用,这种新的平衡能力的出现也正是电徙动寿命得以延长的直接原因.

5 结论

1) 采用深层掩埋 TiW 合金膜自加热结构, 产生了沿金属化条长方向的温度梯度。分别独立的测温结构和试验结构可以实现电徙动实验过程中温度的实时动态测量。

2) 采用电阻测温法精确测定了金属条上的温度分布。该法测温简单易行, 精度在 ± 1 以内, 有很好的实际应用前景。理论模型分析结果很好地吻合了实测结果。

3) 加速应力寿命实验表明, 逆向温度梯度能显著提高金属化电徙动失效时间, 这可以从温度梯度驱动的热扩散离子流作用得到解释。理论分析和实验结果表明, 逆向温度梯度能将金属化电徙动空洞失效位置“推向”阳极。在逆向温度梯度作用下, 首次发现了电徙动电阻变化的“新平衡现象”。

参 考 文 献

- [1] X. X. Li *et al.*, International Conference on Material and Process Characterization for VLSI, 1991, Shanghai, China
- [2] F. Giroux *et al.*, Proc. IEEE International Conference on Microelectronics Test Structure, 1994, 7: 244~ 217.
- [3] M. Sakimoto *et al.*, IEEE International Reliability Physics Proceedings, U.S.A., 1995, 333~ 341.
- [4] 高光渤, 李学信著, 半导体器件可靠性物理, 北京: 科学出版社, 1985.

Electromigration Dependence on Temperature in VLSI Metallization

Li Zhiguo, Guo Weiling, Zhu Hong, Ji Yuan, Cheng Yaohai,
Sun Yinghua, Zhang Wanrong

(Electronic Engineering Department, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

Received 28 March 1997, revised manuscript received 20 August 1997

Abstract Electromigration is the main failure mode in VLSI metallization system. In this article, temperature gradient along the metallization stripe is obtained by adopting novel buried self-heating TiW alloy film. Using the separate metal stripes, one for experiment and the other for temperature measurement, and the linear relation between resistance and temperature, we measure temperature along the stripe accurately. The dynamic relation between electromigration and temperature gradient is investigated for the first time. The experiment results show that electromigration median time to failure, open failure location and electromigration resistance change indicate new characteristic behaviors within temperature gradient 20~ 35 .

EEACC: 2570, 7320R; **PACC:** 6610, 6630Q