

金属互连结构的电迁移仿真分析

邓 登, 崔海坡

(上海理工大学 教育部微创医疗器械工程中心, 上海 200093)

摘 要: 针对集成电路中金属互连线的电迁移现象,应用有限元分析软件 ABAQUS,对铝硅合金互连线的电迁移过程进行了电热耦合研究,分析了不同电流密度与电势梯度、热通量、互连线内部总能量之间的相互关系,比较了不同结构尺寸对铝互连线电迁移失效的影响规律. 结果表明,在互连线的狭窄部位,电势梯度和热通量达到最大值并具有集中性;电势梯度和热通量与通电时间及电流密度均成正比比例关系;随着通电时间的延长,互连线内部总能量的变化趋势为先急剧下降再上升并达到某一平衡值;随着铝互连线宽度的增加,互连线内部的热通量逐渐减小. 对于文中分析的结构模型,当互连线宽度低于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 后,互连线失效的概率将大幅度增加.

关键词: 电迁移; 互连线; 电热耦合; 电流密度

中图分类号: TG 457 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)01-0075-04

0 序 言

随着集成电路特征尺寸的不断减小,金属导线通入的电流密度急剧上升,芯片集成度的提高导致单位面积功耗增大,金属互连线的可靠性一直是集成电路设计和制造所关心的重要问题^[1,2]. 在金属导线中,沿电场反方向运动的电子与金属离子进行动量交换,导致金属离子产生由扩散主导的质量运输,这种现象被称为电迁移^[3,4],它是集成电路失效的主要原因.

电迁移试验可获得互连线失效的时间和电阻变化等数据,但无法直接得到互连线中的电势梯度分布、热通量分布以及互连线内部总能量的变化规律等,而上述参数又是集成电路抗电迁移设计中需要考虑的重要因素. 与试验相比,有限元分析是较为有效的数值分析方法,可以方便地获得互连线的温度分布以及热通量等数据^[5,6].

文中应用有限元分析软件 ABAQUS,以铝硅合金互连线为研究对象,对其电迁移过程进行了电热耦合仿真分析,研究了不同电流密度与电势梯度、热通量、互连线内部总能量之间的相互关系,分析了上述参数随通电时间的变化过程,比较了不同结构尺寸对铝互连线电迁移失效的影响规律,从而为集成电路的可靠性设计提供参考依据.

1 有限元建模

1.1 几何模型

根据 JEDEC 标准^[2],文中的电迁移分析选择 SWEAT 结构模型,如图 1 所示,其组成元件自下而上包括硅基底、 SiO_2 绝缘层、铝互连线三层结构. 其中硅基底的厚度为 $5\text{ }\mu\text{m}$, SiO_2 绝缘层的厚度为 $2.2\text{ }\mu\text{m}$. 铝互连线的结构单元如图 2 所示,其厚度为 $0.88\text{ }\mu\text{m}$,其它尺寸参数如表 1 所示^[7]. 为模拟实际的电迁移过程,在铝互连线上两端添加了 $80\text{ }\mu\text{m} \times 80\text{ }\mu\text{m}$ 的铝电极.

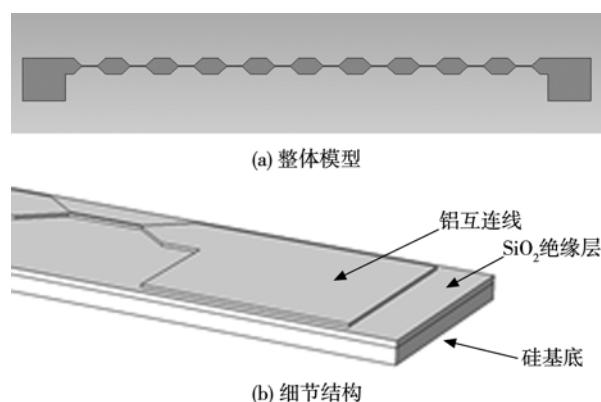


图1 SWEAT 结构模型

Fig. 1 SWEAT model

为了比较不同铝互连线宽度(表 1 的参数 d)对其电迁移效应的影响规律^[6],文中选择了 5 种不同的铝互连线宽度,分别为 $1.6, 2, 2.4, 2.8$ 和 $3.2\text{ }\mu\text{m}$.

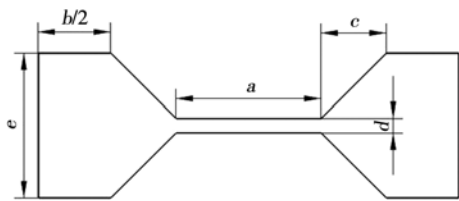


图 2 铝互连线结构单元
Fig. 2 Structural unit of Al-Si interconnect

表 1 铝互连线尺寸参数
Table 1 Model dimension parameters

a	b	c	d	e
30	30	13.5	3	30

表 2 材料性能参数
Table 2 Material properties

材料	弹性模量 <i>E</i> /GPa	泊松比 μ	热传导率 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	电阻率 $\rho/(10^{-8}\ \Omega\cdot\text{m})$	热膨胀系数 α_l/K^{-1}						
					200 K	300 K	400 K	500 K	600 K	700 K	800 K
Al(1% Si)	69	0.35	240.00	$3.24 \times (1 + 3.5 \times 10^{-3} (T - 303))$	20.3	23.23	25.10	26.40	28.40	30.90	34.00
Si	71	0.16	1.75	1 010.0	2.24	2.64	3.20	3.50	3.70	3.90	4.10
SiO ₂	130	0.28	80.00	4.4	0.35	0.50	0.61	0.63	0.59	0.53	0.47

移加速寿命试验,有限元分析设定的环境温度为 200 ℃. 边界条件为对硅基底下表面的 z 方向施加固定约束.

2 结果分析

2.1 不同电流密度对互连线电迁移的影响分析

对所建立的 SWEAT 结构模型分别施加 5 种不同的电流密度. 图 3 是在 $3.5\text{ MA}/\text{cm}^2$ 电流密度条件下互连线上的电势梯度矢量(EPG)分布. 从图 3 中可以看出,在铝互连线的狭窄部位,电势梯度达到最大值,该结果与文献[9]的试验结论是一致的. 这主要是因为引线的形状可以改变电流密度的分布,在狭窄部位引起了电流的聚集,此处将产生局部的空位流增量,电迁移现象将更为显著^[10-12]. 对于不同的电流密度条件,其分析结果有类似的规律.

为直观地分析通电时间、电势梯度以及电流密度三者之间的关系,提取了互连线狭窄部位中间同一节点的电势梯度值,并绘出了其随通电时间的变化曲线,如图 4 所示. 从图 4 中可以看出,在相同的通电时间内,电流密度越大,对应的电势梯度也越大;在同一电流密度条件下,随着通电时间的不断延长,互连线中的电势梯度逐渐增加. 这主要与互连

1.2 材料参数

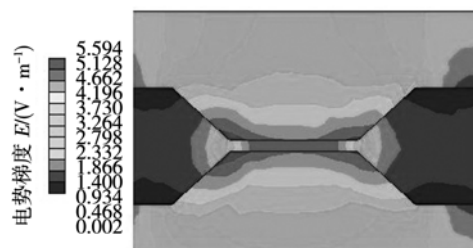
文中的铝互连线选择铝硅合金 Al(1% Si),各组成材料的性能参数如表 2 所示^[7,8].

1.3 载荷与边界条件

金属互连线的电迁移是以电流密度来定义和区分电流大小的,选取互连线中一个电极端的横截面作为电流密度施加端,选择另一个电极端的横截面,定义其电势为 0. 为了比较不同电流密度对互连线电迁移效应的影响规律,文中选择了 5 种不同的电流密度,分别为 $1.9, 2.3, 2.7, 3.1$ 和 $3.5\text{ MA}/\text{cm}^2$. 在分析电流密度的影响规律时,固定铝互连线宽度为 $3.0\text{ }\mu\text{m}$. 而在分析互连线宽度的影响规律时,固定电流密度为 $6.0\text{ MA}/\text{cm}^2$. 为了模拟真实的电迁



(a) 整体模型



(b) 细节结构

图 3 电势梯度分布云图

Fig. 3 Distributions of EPG

线中的电阻变化有关. 随着通电时间的延长,互连线的温度升高,导致其电阻相应的增大,从而导致电势梯度的增加,并在变化过程中呈线性关系.

电迁移过程的另一宏观表现是互连线的热效应. 图 5 是互连线在 $3.5\text{ MA}/\text{cm}^2$ 电流密度下热通量向量(HFL)云图. 从图 5 中可以看出,互连线狭窄部位的温度上升十分明显,并且具有集中性. 通电时间、热通量以及电流密度三者之间的关系如图 6 所示. 从图 6 中可以看出,在不同电流密度条件下,虽然随着通电时间的不断延长,热通量的变化

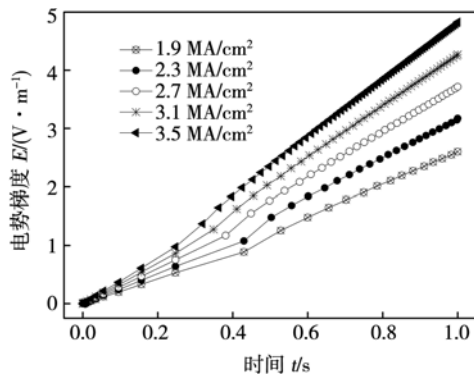


图 4 不同电流密度下 EPG 与时间的关系

Fig. 4 EPG versus time for different current density

规律具有一致性,但是在相同的通电时间内,热通量的最大值是不同的,其随着电流密度的增加而增大。

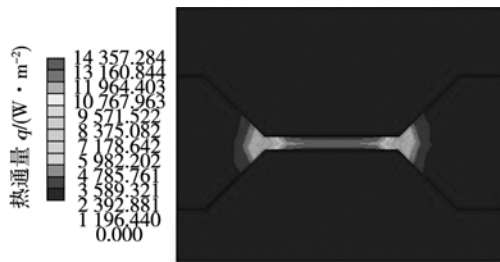


图 5 互连线的热通量分布云图

Fig. 5 Distributions of HFL

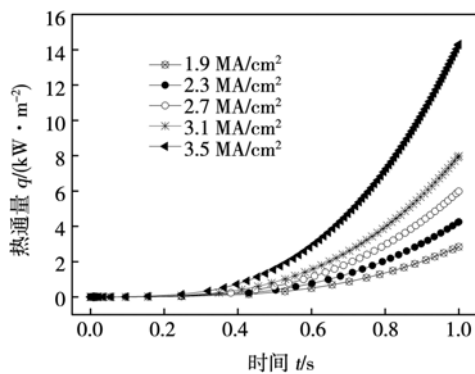


图 6 不同电流密度下热通量随时间的变化

Fig. 6 HFL versus time for different current density

除对热效应会产生影响外,电流密度的差异对互连线内部的总能量也有较大的影响^[13]. 图 7 为不同电流密度与互连线内部总能量的关系曲线. 从图 7 中可以看出,当电流密度从 1.9 MA/cm^2 增加到 2.3 MA/cm^2 时,互连线内部的总能量升高了 1 倍. 而当电流密度高于 2.7 MA/cm^2 后,其对总能量的影响逐渐减弱. 总体来看,随着电流密度的增加,互连线内部的总能量也在增大. 从图 7 中还可以看

出,随着通电时间的延长,互连线内部总能量的变化趋势为先急剧下降再上升并达到某一平衡值. 这可能是由于 Al-Si 互连线与 SiO_2 绝缘层之间发生了热传递的原因,随后达到平衡点. 这种能量的传递会一定程度上减小互连线内部的能量,对电迁移有一定的延缓作用.

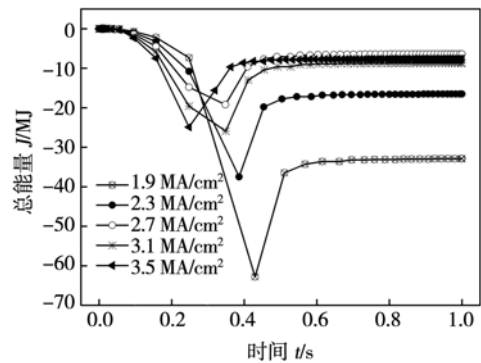


图 7 互连线内部的总能量随时间的变化

Fig. 7 Total energy versus time relationships

2.2 不同互连线尺寸对电迁移的影响分析

分别对 5 种不同铝互连线宽度的 SWEAT 结构模型施加 6.0 MA/cm^2 的电流密度载荷,并获取其内部的热通量分布. 5 种结构模型的分析结果均表明,热通量在铝互连线的狭窄部位达到最大值并具有集中性. 热通量最大值与铝互连线宽度的关系曲线如图 8 所示.

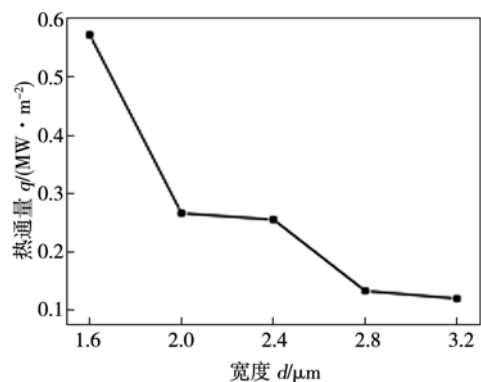


图 8 热通量最大值与互连线宽度的关系曲线

Fig. 8 Maximum of HFL versus width of interconnect relationships

从图 8 中可以看出,在总体趋势上,随着铝互连线宽度的增加,互连线内部的热通量逐渐减小,且在初始阶段(互连线宽度从 $1.6 \mu\text{m}$ 增加到 $2 \mu\text{m}$),热通量下降的较为剧烈,后期逐渐趋于平缓. 该趋势表明,当互连线宽度低于 $2 \mu\text{m}$ 后,互连线失效的概

率将大幅度增加。

3 结 论

(1) 在互连线的狭窄部位,电势梯度和热通量均达到最大值并具有集中性,此处将产生局部的空位流增量,电迁移现象将更为显著。

(2) 在同一电流密度条件下,随着通电时间的不断延长,互连线中的电势梯度和热通量逐渐增加;在相同的通电时间内,电流密度越大,对应的电势梯度和热通量也越大。

(3) 随着通电时间的延长,互连线内部总能量的变化趋势为先急剧下降再上升并达到某一平衡值。这可能是由于互连线与绝缘层之间发生了能量的传递,在一定程度上减小互连线内部的能量,对电迁移有一定的延缓作用。

(4) 随着铝互连线宽度的增加,互连线内部的热通量逐渐减小。且在初始阶段热通量下降的较为剧烈,后期逐渐趋于平缓。对于文中分析的 SWEAT 结构模型,当互连线宽度低于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 后,互连线失效的概率将大幅度增加。

参考文献:

- [1] Chawla N. Thermal fatigue behavior of Sn-rich (Pb-free) solders [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39A: 799–810.
- [2] JEDEC Solid State Technology Association. JESD61 JEDEC standard; standard method for calculating electro migration model parameters for current density and temperature [S]. USA; JEDEC Solid State Technology Association, 2007.
- [3] Hiroyuki A, Mikio M, Kazuhiko S, *et al.* A comparison of electromigration failure of metal lines with fracture mechanics [J]. Acta Mechanica Sinica, 2012, 28(3): 774–781.
- [4] 王家兵, 孙凤莲, 刘 洋. 微量元素对无铅焊点电迁移性能的改善[J]. 焊接学报, 2012, 33(2): 29–32.
Wang Jiabing, Sun Fenglian, Liu Yang. Improvement electromi-
- gration resistance of Pb-free solder joints with element addition [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(2): 29–32.
- [5] Zhang J S, Xi J, Wu Y P, *et al.* Thermomechanical stress and strain in solder joints during electromigration [J]. Journal of Electronic Materials, 2009, 38(5): 678–684.
- [6] Fu C M, Tan C M, Wu S H, *et al.* Width dependence of the effectiveness of reservoir length in improving electromigration for Cu/low-k interconnects [J]. Microelectronics Reliability, 2010, 50: 1332–1335.
- [7] 梁利华, 张元祥, 刘 勇, 等. 金属互连结构的电迁移失效分析新算法 [J]. 固体力学学报, 2010, 31(2): 164–172.
Liang Lihua, Zhang Yuanxiang, Liu Yong, *et al.* A new algorithm for electromigration failure analysis of metal interconnects [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010, 31(2): 164–172.
- [8] Dalleau D. 3D time-depending simulation of void formation in metallization structures [D]. Hannover: Hannover University, 2003.
- [9] Ogawa E T, Lee K D, Blaschke V A, *et al.* Electromigration reliability issues in dual-damascene Cu interconnections [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2002, 51(4): 403–419.
- [10] He H W, Cao L Q, Hao H, *et al.* Thermoelectric coupling effect on the interfacial IMC growth in lead-free solder joint [J]. IEEE International Symposium on Advanced Packaging Materials, 2013, 2: 223–229.
- [11] Jeon I, Park Y B. Analysis of the reservoir effect on electromigration reliability [J]. Microelectronics Reliability, 2004, 44(6): 917–928.
- [12] Singh N, Bower A F, Shankar S. A three-dimensional model of electromigration and stress induced void nucleation in interconnect structures [J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2010, 18: 1–20.
- [13] Dandu P, Fan X J, Liu Y, *et al.* Finite element modeling on electromigration of solder joints in wafer level packages [J]. Microelectronics Reliability, 2010, 50: 547–555.

作者简介: 邓 登,男,1988 年出生,硕士研究生。主要研究方向为金属互连结构电迁移的可靠性问题。发表论文 1 篇。Email: ddeng@foxmail.com

通讯作者: 崔海坡,男,博士,副教授,硕士研究生导师。Email: h_b_cui@163.com