

ULSI 中铜互连线通孔电热性能的数值模拟

李志国, 卢振钧

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100022)

摘 要: 利用三维有限元模型对 Cu 互连线通孔进行了电流密度、温度和温度梯度的分布进行了模拟, 比较了具有不同阻挡层材料的通孔内的电流密度、温度和温度梯度的分布. 对于同一阻挡层材料, 进行了不同通孔倾斜角的模拟. 模拟结果指出, 通过优化通孔倾斜角和优选阻挡层材料可有效地改善通孔内的电流密度和温度的分布, 提高 ULSI 通孔互连的可靠性, 这对通孔的设计提供了有益的参考.

关键词: 铜互连线; 通孔; 有限元; 阻挡层材料

中图分类号: TN47 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 07-1104-03

Numerical Simulation of Electric and Thermal Characteristic in ULSI Copper Filled Interconnect Via Hole

LI Zhi2guo, LU Zhen2jun

(The School of Electronics and Control Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

Abstract: Three2dimension finite element modeling has been used to simulate and compare the current density, temperature and the gradients of distribution in Copper2filled via hole structure. To the same barrier material, the via hole with different slope has been simulated. The result of the simulation shows that optimizing the slope of the via hole and selecting the barrier material will improve the interconnect reliability. All these provide valuable reference to the design of the via hole.

Key words: Cu interconnect; via; finite element; barrier material

1 引言

铜互连线作为一种新的互连技术, 与 Al 相比具有电阻率低, 功耗低, RC 时间常数小, 抗电迁徙和应力迁徙能力强等优点, 并有取代 Al 互连线的趋势. 在高速电路中为了减小芯片体积, 缩短信号的传输距离, 减小 RC 时间常数, 常常采用多层布线结构. 目前国际上已做到 7 层, 一块芯片上具有多达上万个通孔, 通孔处的结构特点是高形貌比 (通孔直径 0.1 μm, 介质层的厚度 0.5 μm 以上, 形貌比为 5), 通孔面积小, 电流密度大, 热效应明显, 应力集中, 高形貌比使薄膜淀积台阶覆盖率差, 通孔底部和侧壁淀积的金属膜薄, 成为 ULSI 中可靠性的一个薄弱环节和失效的敏感部位. 其在 Cu 布线电迁徙失效中所占比例最大, 成为 ULSI 中可靠性研究的一个热点.

本文利用 MARC 软件模拟铜互连线在大电流应力条件下, 不同阻挡层材料的铜布线及相同材料、不同倾斜角的通孔的电流密度、温度和温度梯度分布特性, 比较了 SiON, Ta, TiN 几种阻挡层材料下铜布线的性质, 并对通孔的结构作出了相应的优化, 以改善铜互连线的电迁徙性能.

2 模型的建立

我们对 Cu 布线和通孔结构进行了三维的有限元模拟. 模

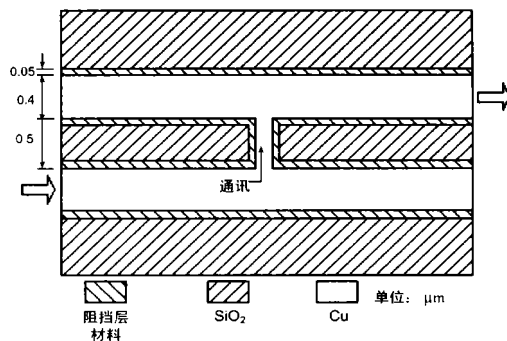


图 1 模型的截面图

型依据实际样品的结构来构成. 模型的底部为热沉材料, 在这里用的是铜, 厚度 10 μm, 铜上面是硅衬底, 由于受到网格数目的限制, 厚度取了 100 μm, 硅上面是二氧化硅, 厚度为 10 μm. 铜布线由二氧化硅包围, 其分为上下两层, 中间由通孔相连. 上下铜布线的长度为 10 μm, 膜厚为 0.4 μm, 宽 0.5 μm. 中间的通孔为圆柱形, 孔径为 0.25 μm, 高 0.5 μm. 阻挡层材料包在铜布线的外面, 厚度为 0.05 μm, 模型上部的截面图见图 1. 阻挡层材料分别选取了 SiON、Ta、TiN, 以进行比较, 通孔的倾角分别为 0, 10, 20, 30 度. 为了和实际条件尽可能相似, 模型的边界

条件设为: 对铜布线加电流密度为 $j = 1 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 的电应力, 电流方向如图 1 中所示; 衬底温度为 30°C , 加在底部单元. 初始条件为环境温度 30°C , 加载到全部单元, 保证了与实际情况相一致.

3 模拟结果及分析

3.1 不同倾角通孔的温度和电流密度分布

现以 Ta 做阻挡层为例说明通孔不同倾角时通孔内的温度、温度梯度及电流密度分布. 图 2, 3 显示了零度倾角通孔内有最高的电流密度 $3.77 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 和温度分布 63.3°C . 而在 20° 度倾角时, (图 4, 5) 最高电流密度分布点移出通孔而位于通孔底部, 其值为 $2.74 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$, 减小 $1.03 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$. 最高温度点移出通孔而位于底层布线上, 最高温度值为 43.7°C ,

降低了 19.6°C . 10° 度和 30° 度倾斜角(见图 6, 7)在电流密度和温度分布均不如 20° 度角.

3.1.2 不同填充材料通孔内的温度和电流密度分布

其它的几种材料的参数分布图的形状与 Ta 大致相同, 但是由于其材料性能不同, 导致其数值大小的差异. 图 8, 9 显示了 Ta、TiN、SiON 这三种阻挡层材料在衬底 30°C 下 20° 度倾斜角时通孔内的电流分布, 温度分布图限于篇幅未列出. 表 1 进一步比较了 Ta、TiN、SiON 这三种阻挡层材料在 30°C 衬底不同倾角时通孔内的最大电流、温度、温度梯度的分布. 可以看出, 就同种结构而言, Ta 的性能最好, TiN 次之, SiON 最差. 这是因为这三种材料热导率, 电阻率从小到大依次为 Ta、TiN、SiON, 其材料的性质直接影响了其电流、温度、温度梯度的分布.

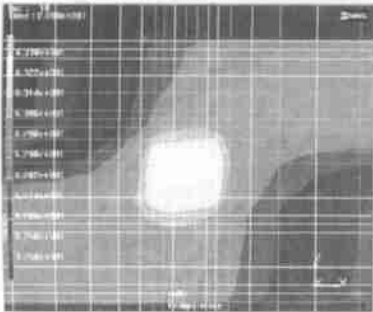


图 2 Ta 在 30°C 衬底下的温度分布图(0° 度倾角)

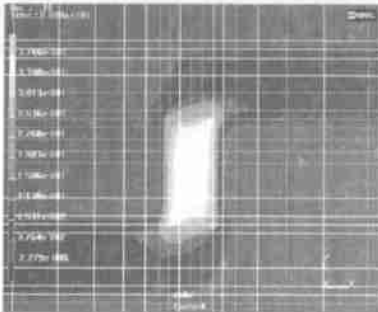


图 3 Ta 在 30°C 衬底下的电流密度分布图(0° 度倾角)

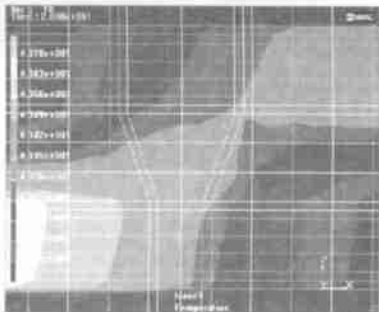


图 4 Ta 在 30°C 衬底下的温度分布图(20° 度倾角)

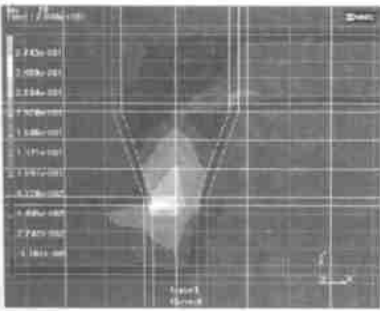


图 5 Ta 在 30°C 衬底下的电流密度分布图(20° 度倾角)

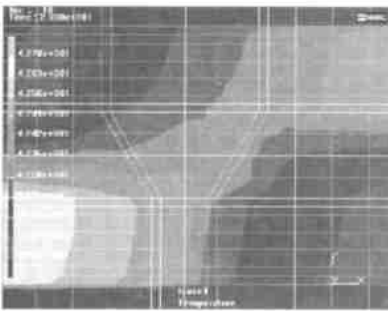


图 6 Ta 在 30°C 衬底下的电流密度分布图(30° 度倾角)

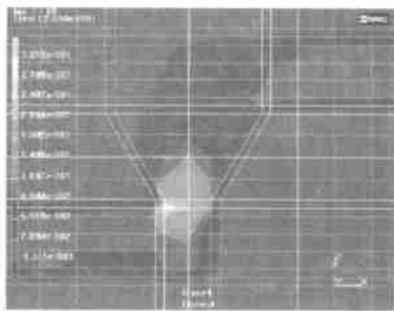


图 7 Ta 在 30°C 衬底下的电流密度分布图(30° 度倾角)

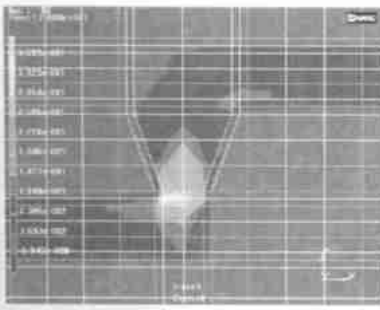


图 8 TiN 在 30°C 衬底下的电流密度分布图(20° 度倾角)

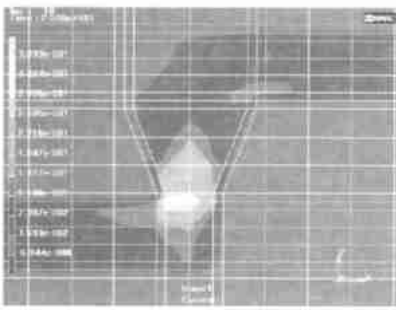


图 9 SiON 在 30°C 衬底下的电流密度分布图(20° 度倾角)

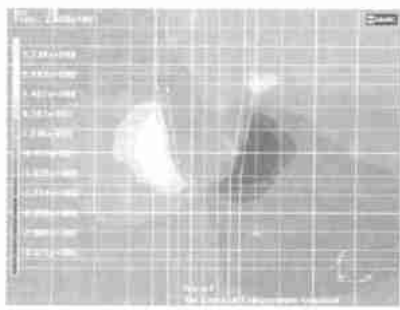


图 10 TiN 在 30°C 衬底下的温度梯度分布图(20° 度倾角)

3.1.3 温度梯度分布情况

在模拟中发现, 在通孔的左、右两侧出现一正、一负的温度梯度, 见图 10. 正负的温度梯度都出现在靠近电流流入的方向, 并在金属条与孔的拐角处达到最大值, 说明温度在此处

变化最大;同时,在流出的拐角处有一个正温度梯度的次大值,说明了其也是一个温度变化的敏感点.对于不同倾角的模拟,对照表 1,可以看出 20 度时达到最优值,温度梯度的变化率最小.对不同阻挡层材料进行比较,温度梯度的变化率由小到依次是 Ta、TiN、SiON.

表 1 Ta、TiN、SiON 三种阻挡层材料在衬底 30e 时不同倾角通孔内最大电流密度和温度及温度梯度的比较

T_i, T_{grad} 倾角		0b	10b	20b	30b
$T_{\text{max}}(\text{e})$	Ta	63.3	44.8	43.4	42.4
	TiN	67	46.2	44.8	44
	SiON	68.1	47.0	45.7	42.5
$j_{\text{max}}(\text{A}/\text{cm}^2)$	Ta	3.77E7	3.42E7	2.74E7	3.01E7
	TiN	4.52E7	4.45E7	3.69E7	4.11E7
	SiON	4.55E7	4.51E7	3.69E7	4.17E7
T_{grad}	Ta	+ 2.00	+ 1.82	+ 0.93	+ 0.95
		- 1.91	- 1.30	- 0.74	- 1.15
	TiN	+ 2.12	+ 1.89	+ 1.00	+ 2.51
		- 2.02	- 1.34	- 0.81	- 1.27
	SiON	+ 3.55	+ 1.91	+ 0.94	+ 0.94
		- 3.36	- 2.05	- 1.16	- 0.94

4 结论

本文对不同阻挡层材料和不同倾斜角铜互连线通孔内的电流、温度、温度梯度分布进行了模拟,得到如下结论:

(1)对于同一种阻挡层材料,随着通孔倾斜角的增大,通孔中的最高温度下降,而最大电流密度及温度梯度是先降后升,在 20 度角时最小,所以在实际工艺中接近 20 度角效果最好.通孔内温度和温度梯度及电流密度随倾斜角变化如图 11、12 所示(以 Ta 为例).

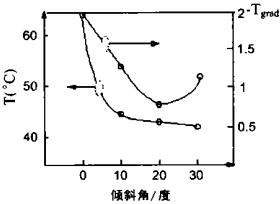


图 11 温度与温度梯度与倾斜角的关系图

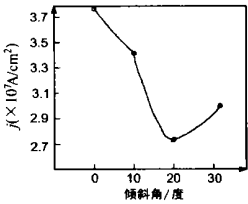


图 12 电流密度与倾斜角关系图

(2)对于 Ta、TiN、SiON 三种阻挡层材料,在通孔取相同的倾斜角条件下(采用优化设计,取 20 度倾斜角),考虑通孔内的温度、温度梯度、电流密度分布,以 Ta 最有优越性,通孔内最大电流密度值依次为 SiON、TiN、Ta.

上述模拟结果为亚微米级和深亚微米级的铜布线设计提供了有益的参考.

参考文献:

[1] Dipankar Pramanik, Vivek Jain. Barrier Metals for ULSI: Processing and Reliability [J]. Solid State Technology, 1991, 34(5): 97- 102.

[2] S C Sun. Process Technologies for Advanced Metallization and Interconnect Systems [A]. IEDM [C]. USA: IEEE, 1997.

[3] S Venkatesan A. V Gelatos. A High Performance 1.8V 0.20μm CMOS Technology with Copper Metallization [A]. IEDM [C]. USA: IEEE, 1997.

[4] D Edelstein, J Heidenreich. Full Copper Wiring in a Sub20125Lm CMOS ULSI Technology [A]. IEDM [C]. USA: IEEE, 1997.

[5] Alvin L S Loke. Kinetics of Copper Drift in Low2k Polymer Interlevel Dielectrics [J]. IEEE TRANSACTIONS ELECTRON DEVICES, 1999, 46(11): 2178- 2187.

[6] S Simon Wong, Alvin L S. Electrical Reliability of Cu and Low2k Dielectric Integration [A]. MRS Spring Meeting [C]. San Francisco: CA, 1998.

[7] Ahsan Enver, J Joseph Clement. Finite Element Numerical Modeling of Current in VLSI Interconnect [A]. IRPS [C]. USA: IEEE, 1990.

[8] T Wada, I Matsuo. Effect of Barrier Under First Aluminum Layer on Reliability of Interconnect Vias Connect [A]. V2MLC [C]. USA: IEEE, 1990.

作者简介:



李志国 男, 1940 年生于北京, 1966 年毕业于北京大学技术物理系, 现为北京工业大学电子信息与控制工程学院教授, 博士生导师, 主要从事半导体器件、集成电路的可靠性研究, 已发表学术论文 80 余篇, 专著 1 本, 获得省部级科技进步奖 4 项.



卢振钧 男, 1976 年生于浙江嘉兴, 1999 年毕业于南开大学电子系, 获理学学士学位, 2002 年获北京工业大学电子信息与控制工程学院硕士学位, 主要从事 ULSI 互连可靠性的研究.