

ULSI 互连系统热特性的模拟

阮 刚¹ 肖 夏²

(1 复旦大学专用集成电路与系统国家重点实验室, 上海 200433)

(2 Chemnitz 技术大学微技术中心, Chemnitz D-09107, 德国)

摘要: 应用基于有限元算法的软件 ANSYS 对 $0.15\mu\text{m}$ 工艺条件下的一个 ULSI 电路的五层金属互连结构进行了热特性模拟和分析. 模拟了这个经多目标电特性优化了的互连结构在采用不同金属 (Cu 或 Al) 互连线及不同电介质 (SiO_2 或低介电常数材料 xerogel) 填充条件下的热分布情况, 计算了这些条件下此互连结构的温度分布. 并将结果与 Stanford 大学模拟的另一种五层金属布线结构的热特性结果进行了比较. 讨论了低介电常数材料的采用对于互连结构散热情况的影响. 此外, 还简要地介绍了 ANSYS 的性能和用于热模拟的原理和特色.

关键词: ULSI 互连; xerogel; 热特性模拟

EEACC: 2570

中图分类号: TN405.97

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)08-1081-06

1 引言

极大规模集成电路 (ULSI) 向着高密度、多功能、高速度、低功耗方向迅猛发展. 器件的特征尺寸日益减小, 金属互连结构日趋复杂. 互连的金属线愈益变细变密, 金属层数已由 $0.18\mu\text{m}$ 工艺的四层向着 $0.10\mu\text{m}$ 工艺的七层快速发展^[1]. 现今, 芯片的最大面积可达 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$, 时钟频率可达 1GHz , 复杂的微处理器芯片可包含 2000 万个晶体管. 芯片内关键的金属互连线如时钟线、控制线等有可能横跨整个芯片. 随着芯片内金属互连线尺寸的不断缩小, 芯片面积的不断增大, 同时追求更高的工作速度, 金属互连系统就会遇到很多问题. 主要包括: 寄生电容效应、信号延迟及串扰、功耗、散热等. 为提高 ULSI 电路的性能, 在金属互连问题上采取的措施主要有以下三个方面: (1) 采用低介电常数材料替代传统的 SiO_2 以减小寄生电容; (2) 采用低电阻率材料作为传输线来替代传统的 Al 金属以减小电阻; (3) 对金属互连的几何参数进行优化以满足电特性及热特性等方面的要求. 随着低介电常数材料的采用, ULSI

电路的散热问题变得尤为突出. 传输线上的焦耳热必须通过电介质传导到 Si 衬底上以避免器件的误操作甚至失效. 但是, 介电常数低材料通常其热导率也很低^[2]. 这意味着金属互连系统存在着严重的散热问题. 因此, 必须对金属互连系统存在的热问题进行数值模拟. 应用有限元算法软件 ANSYS^[3] 对 ULSI 电路中存在的问题通过数值模拟进行估计分析还是近几年的事, 它可用来有效地对 ULSI 电路中金属互连系统的热特性进行模拟^[4-6]; 在微电子领域, ANSYS 模拟的应用正在不断开发, 如已应用在对 ULSI 电路中金属互连系统寄生电容的计算和优化设计^[7]; 对用在 ULSI 电路中的低介电常数 (low k) 介质 aerogel 的有效介电常数 k_{eff} 的计算及其模型研究等^[8].

ANSYS 是由 Swanson Analysis System, Inc. 开发研制的著名大型模拟软件. 它基于有限元算法, 不但可用于分析线性、静态等简单的问题, 而且还用于分析非线性及瞬态等复杂问题. 具有广泛的适用范围.

本文用 ANSYS 对 $0.15\mu\text{m}$ 工艺条件下经多目标电特性优化的 ULSI 电路金属互连系统的一个五

阮 刚 男, 1935 年出生, 复旦大学教授, 博士生导师, 主要从事 ULSI 工艺、器件及电路的模型及模拟研究.

肖 夏 女, 1971 年出生, 德国 Chemnitz 技术大学博士生, 主要从事 ULSI 电互连及光互连研究.

2000-09-02 收到, 2000-12-26 定稿

层金属布线结构^[8]进行热特性模拟和分析。

2 ULSI 金属互连系统热特性的模拟

为了提高 ULSI 电路的性能,要在金属互连系统中采用低介电常数材料来替代传统的 SiO₂ 以减小寄生电容.因此,ULSI 电路的散热问题也随之变得尤为突出.由于低介电常数电介质的热导率通常都很低^[2],导致传输线上产生的焦耳热难以通过电介质传导到 Si 衬底上.如果系统的温度超过一定范围,将会引起器件的误操作甚至失效.因此,对 ULSI 电路互连系统的热特性研究已成为 ULSI 电路互连系统研究中的主要课题之一.

本文对图 1 所示的 0.15 μm 工艺的五层金属特性优化布线结构进行了热特性模拟.此结构的几何尺寸列于表 1 中^[11].金属布线分别采用 Cu 和 Al 两种金属化材料,电阻率分别为: $\rho_{\text{Cu}} = 1.80\mu\text{m} \cdot \text{cm}$, $\rho_{\text{Al}} = 2.88\mu\text{m} \cdot \text{cm}$,热导率分别为: $\lambda_{\text{Cu}} = 390\text{W}/(\text{K} \cdot \text{m})$, $\lambda_{\text{Al}} = 195\text{W}/(\text{K} \cdot \text{m})$ ^[9],通过金属的电流密度为 $0.5\text{MA}/\text{cm}^2$.互连结构中介质填充分三种情况:(1) 金属层间及金属线间的介质均为 SiO₂; (2) 金属层间及金属线间的介质均为低 k 材料,此处采用纳米多孔二氧化硅材料 xerogel; (3) 金属层间的介质为 SiO₂, 金属线间的介质为 xerogel. PECVD

工艺得到的薄膜 SiO₂,热导率为 $1.0\text{W}/(\text{K} \cdot \text{m})$,介电常数为 4.1. xerogel 是一种具有超低介电常数的电介质材料,且具有高电介质强度(电介质击穿电场大于 $2\text{MV}/\text{cm}$),高热稳定性(高至 900°C),同硅及正硅酸乙脂(TEOS)有好的粘附性,以及有好的间隙填充能力,是一种有希望最终用于 ULSI 电路互连系统的超低介电常数介质^[10].对于上述第二种介质填充情况, xerogel 的热导率为 $0.065\text{W}/(\text{K} \cdot \text{m})$,介电常数为 1.8,对应于 75% 的孔占率.对于第三种介质填充情况,嵌入式的 xerogel 的热导率为 $0.010\text{W}/(\text{K} \cdot \text{m})$,介电常数为 1.3,对应于 90% 的孔占率^[5].

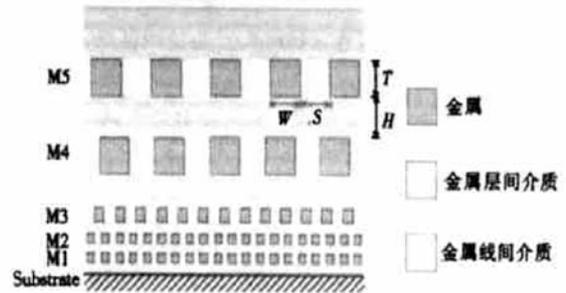


图 1 模拟用的经多目标电特性优化了的 0.15 μm 工艺五层金属布线结构剖面图

FIG. 1 Profile of Five-Layer Metallization Interconnect Structure Based on Multi Objective Optimization of Electrical Performance Used for Simulation

表 1 五层金属互连结构的几何参数(单位: μm)

Table 1 Geometric Parameters for Five-Layer Metal Interconnect Structure (unit: μm)

	几何参数	金属层 1	金属层 2	金属层 3	金属层 4	金属层 5
0.15 μm 工艺 五层金属优化布线	W	0.162	←	0.18	1.15	1.38
	S	0.198	←	0.18	1.15	1.27
	T	0.162	←	0.31	2	2
	H	0.396	←	0.36	2	2
Stanford 大学 模拟采用的五层金属布线	$W+S$	0.72	←	←	←	←
	T	0.8	←	←	←	←
	H	1.0	←	←	←	←

注:表中 W 为金属线宽, S 为线间距, T 为金属线厚度, H 为金属层间距, ← 表示本金属层的几何参数与上一金属层的几何参数相同.

ANSYS 热特性分析的理论是基于能量守恒原理的热力学第一定律:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} + \frac{dW}{dt} \quad (1)$$

即系统的总能量 E 等于系统吸收的热量 Q 和外界对系统所作的功 W 之总和. ANSYS 首先对所分析的系统进行热单元模块网格划分,然后采用有限元

算法求解热传导方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

其中 \dot{q} 为单位体积内的产热率; k_x 、 k_y 、 k_z 分别为在 x 、 y 、 z 方向上的热导率; ρ 为密度; T 为温度; t 为时间; C_p 为热容率. 从而,计算出系统中各个结点的温

度并得到与热分析相关的其他参量如热流量、等温线、温度梯度等. ANSYS 可处理所有的热交换方式即传导、对流和辐射, 能够给出系统的温度分布、热损失和增益、热梯度及热流量等信息. 我们所研究的金属互连系统属于稳态热传导问题, 温度 T 与时间 t 无关. 热传导方程中的 \dot{q} 可用下式求得:

$$\dot{q} = \frac{P}{V} = \frac{I^2 R}{V} = \frac{(jA)^2 \rho_{\text{metal}} \frac{L}{A}}{lA} = j^2 \rho_{\text{metal}} \quad (3)$$

其中 P 是热功率; V 是体积; I 是电流强度; j 是电流密度; R 和 ρ 分别是金属线的电阻和电阻率; l 和 A 是金属线的长度和面积.

图 2 所示的等温图对应于图 1 所示布线结构中金属互连结构同衬底间的温差分布情况, 其中介质全部采用 xerogel, 布线采用铜, 并且全部金属线都通电. 图 3 示出了此布线结构相应的热流矢量图, 形

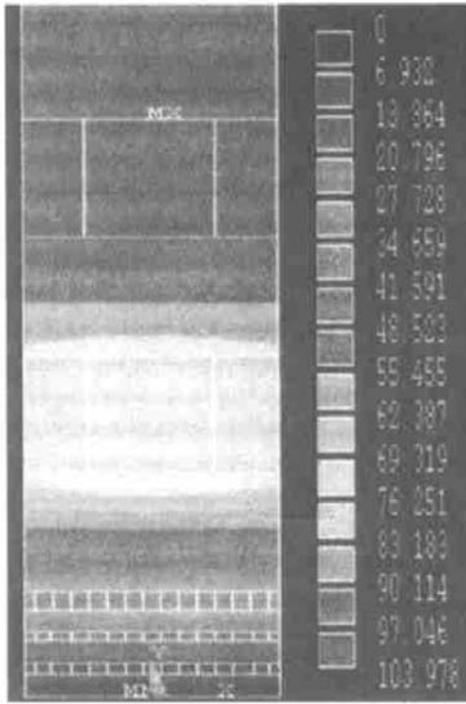


图 2 布线用 Cu, 介质用 xerogel, 全部金属线都通电($j = 0.5 \text{ MA/cm}^2$) 时金属互连结构同衬底间的温差分布图(单位: K)

FIG. 2 Contour of Temperature Difference Between Cu/xerogel Metallization Structure and Substrate All of metal lines are current-carrying ($j = 0.5 \text{ MA/cm}^2$), unit of temperature: K

象地显示了该结构的热传导路径. 表 2 所列为不同布线情况下的热特性模拟结果, 同时还列出了 Stanford 大学对另一种五层互连结构(其几何尺寸

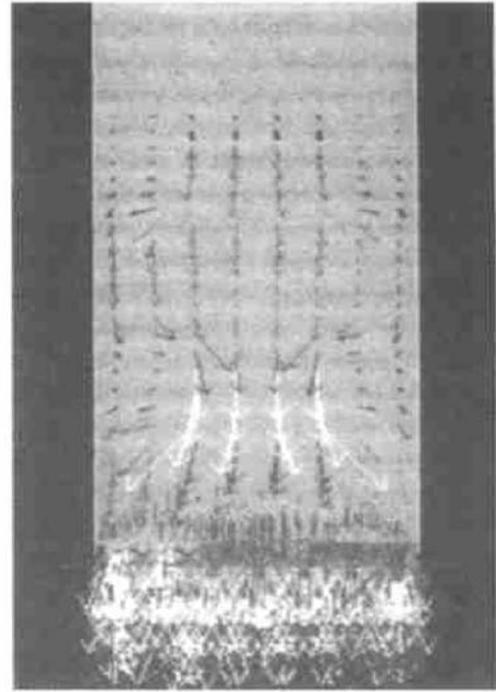


图 3 对应于图 2 情况的热流矢量图

FIG. 3 Heat Flow Vector Corresponding to FIG. 2

见表 1) 的热特性分析^[5]. 两套模拟结果均表明: 对于本节第 2 自然段所述的(1)及(3)两种介质填充情况, 无论是只有最上层金属线通电, 还是全部金属线都通电, 互连系统的温度增加 ΔT (最高层金属温度 T_{top} 与基板温度 T_{sub} 之差) 都很小. 而如果布线结构中全部采用低介电常数材料, 即第(2)种情况, 则温度增加显著. 这说明决定布线系统导热能力的主要因素是金属层之间介质的热导率. 其原因在于: 从横向导热来看, 由于金属层上金属线的间距只有深亚微米至微米量级, 更由于金属线上产生的焦耳热量值相等, 因此金属线之间基本上没有温度差, 也即没有热传递. 从纵向导热来看, 在金属层内, 由于金属的热导率比线间介质的热导率高至少几百倍, 因此热量主要通过金属线导出, 只有少量通过金属线间的介质导出. 在金属层之间, 热量的导出则取决于层间介质的热导率. 又由于金属的导热率远远高于层间介质的导热率, 因此布线系统热阻的绝大部分来源于层间介质. SiO_2 的热导率比 xerogel 的热导率大两个数量级, 因此金属层间介质是 SiO_2 的结构比金属层间介质为 xerogel 的结构的导热情况好得多. 模拟结果显示: 当填充介质全部为 xerogel 时, Al 布线互连系统的 ΔT 很高, 尤其是全部金属线都通电时, ΔT 可高达 103.98 K . 这个温度增高是 ULSI 电路不允许的^[5],

必须要考虑互连系统的散热问题. 在相同的条件下, Cu 布线的温度增高为 64.97K, 比 Al 布线的情况低 1.6 倍. 其原因是 Cu 的电阻率比 Al 的电阻率低 1.6 倍, 因而产生的焦耳热比 Al 布线低 1.6 倍. 虽然 Al 的热导率只有 Cu 的一半, 但由于在互连系统中决定散热能力的主要因素是金属层之间介质的热导率, 所以 Al 布线互连系统的散热能力与 Cu 布线情况区别

微小. 即 Al 布线与 Cu 布线相比, 并未改变互连系统的散热能力, 却使系统焦耳热增加了 1.6 倍, 结果使温度增高比 Cu 布线情况增加 1.6 倍. 模拟结果还表明: 在相同的金属布线及介质填充情况下, 当互连线全部都通电时($j = 0.5 \text{ MA/cm}^2$), 互连系统的温度增高约为只有最上层金属线通电时的 1.63 倍.

表 2 不同电介质填充情况下金属互连结构中的最高温度增高量($j = 0.5 \text{ MA/cm}^2$)

Table 2 Maximum Temperature Increment in Metal Interconnect Structure Under Condition of Different Dielectric Filling ($j = 0.5 \text{ MA/cm}^2$)

金属线间电介质/ 金属层间电介质	图 1 所示五层金属互连结构				Stanford 大学的五层金属互连结构	
	Cu 布线		Al 布线		Al 布线	
	最上层金属通电	全部通电	最上层金属通电	全部通电	最上层金属通电	全部通电
SiO ₂ /SiO ₂	2.60K	4.23K	4.17K	6.77K	1.9K	4.9K
xerogel/SiO ₂	2.83K	4.63K	4.50K	7.44K	2.0K ^{*1}	5.2K ^{*1}
xerogel/xerogel	39.89K	64.97K	62.37K	103.98K	26.1K ^{*2}	76.7K ^{*2}

注: * 1: 介质填充为: 空气隙/SiO₂; * 2: 介质填充为: 低 k 材料/低 k 材料

图 4 所示为互连系统在金属线全部通电的情况下, 温度增高 ΔT 与金属线所载电流密度 j 的关系. 比较了 Cu 及 Al 布线在不同线间介质/层间介质的填充条件下的温度增高. 可以看出, 对于层间介质采用 SiO₂ 的情况, 布线系统的热问题并不很严重, 当 j 值高达 2 MA/cm^2 时, Cu 布线的 ΔT 约为 70K, Al 布线的 ΔT 约为 110K. 如果层间介质采用 xerogel,

则 Cu 布线在 $j = 0.6 \text{ MA/cm}^2$ 时, ΔT 就达到 94K. 随着 j 值的增加 ΔT 显著增高, 从而引起严重的热问题. 图 5 给出了金属线全部通电时, 当线间介质与层间介质都采用相同材料的情况下, 互连系统温度增高与介质热导率的关系. 结果表明: 当 j 值小(例如为 0.5 MA/cm^2) 时, Cu 和 Al 布线在 k 值大于 $0.1 \text{ W/(K} \cdot \text{m)}$ 的条件下, 温度增加不明显; 当 j 值较大(例如大于 1 MA/cm^2) 时, Cu 和 Al 布线的温度增高在 k 值小于 $0.2 \text{ W/(K} \cdot \text{m)}$ 时已变得显著, 需要对布线采取有效的散热措施.

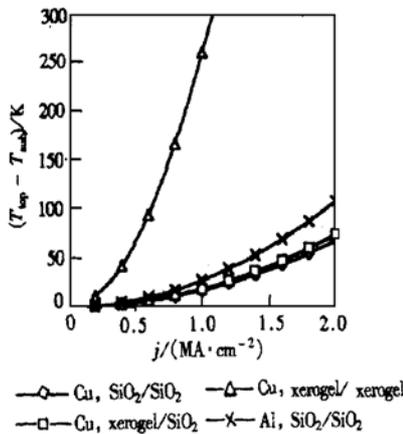


图 4 互连系统温度增高在采用不同材料的金属, 线间介质/层间介质的条件下, 与金属线所载电流密度的关系(金属线全部通电)

FIG. 4 Temperature Increment of Interconnect System Under Conditions of Different Metallic Material and Intra-Dielectric/Inter-Dielectric Versus Current Density Carried by Metal Line All of metal lines are current-carrying.

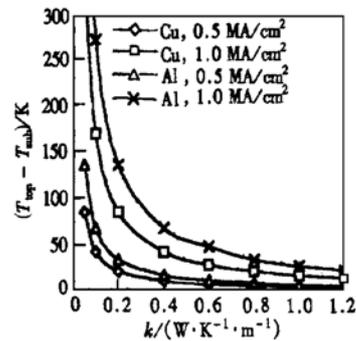


图 5 线间介质与层间介质采用相同材料的情况下, 系统温度增高与介质热导率的关系(金属线全部通电)

FIG. 5 Temperature Increment of Interconnect System Versus Thermal Conductivity of Dielectric Under Condition of Using Same Material for Intra and Inter Dielectric All of metal lines are current-carrying, $j = 0.5 \text{ MA/cm}^2$ or 1.0 MA/cm^2 .

以上讨论表明,热问题已经成为 ULSI 金属布线系统存在的主要问题之一.为了协调金属互连系统在电特性及热特性方面的要求,可采用低介电常数材料作为金属层间介质,而金属线之间的介质依然采用 SiO₂.如果全部介质都采用低介电常数材料,除了需进行互连结构热特性的优化设计和制作外,还必须采取例如双面冷却或层内设置金属热沉^[6]等有效的散热措施.

3 结论

本文应用 ANSYS 软件模拟了 0.15 μm 工艺条件下经多目标电特性优化的一个 ULSI 电路五层金属互连系统的热特性.得到以下结论:

(1) 由于 Cu 及 Al 的热导率比 SiO₂ 及 xerogel 的大至少上百倍,在包含金属线的层内,热流主要通过金属线散出,线间介质无论采用 SiO₂ 还是 xerogel 对互连系统的散热影响不大;在金属层之间,散热决定于层间介质的热导率.因此,对整个互连系统而言,决定散热能力的关键是层间介质的热导率.

(2) 对于 0.15 μm 工艺条件下 ULSI 电路金属互连系统,无论是 Cu 布线还是 Al 布线,只要层间介质采用 SiO₂,互连系统的温度增高就非常小,在 $j = 0.5\text{MA}/\text{cm}^2$ 时,最高也只有 6.77K,但如果介质全部采用低介电常数材料,例如 xerogel,则 Al 金属布线的温度增高可达 103.98K.在此情况下,必须另外考虑互连系统的散热问题.

(3) 在相同的介质填充及金属线通电条件下,Al 布线互连系统的温度增高比 Cu 布线高 1.6 倍,这是由于 Al 的电阻率比 Cu 电阻率高 1.6 倍.但由于决定互连系统散热能力的主要因素是金属层之间介质的热导率,因此尽管 Al 的热导率比 Cu 低一倍,其互连系统的散热能力与 Cu 布线区别甚微.

(4) 在相同的金属布线及介质填充条件下,当互连线全部都通电流 $j = 0.5\text{MA}/\text{cm}^2$ 时,0.15 μm 互连系统的温度增高约为只有最上层金属线通电时的 1.63 倍.

(5) 为了协调金属互连系统在电特性及热特性

方面的要求,可采用低介电常数材料作为金属线间介质,而金属层之间的介质依然采用 SiO₂.如果全部介质都采用低介电常数材料,则必须对互连及其散热结构进行优化设计.

(6) 应用有限元算法软件 ANSYS 对 ULSI 电路金属互连系统进行热特性模拟具有准确、方便且直观的特点.

参考文献

- [1] M. B. Anand, H. Shibata and M. KaKumu, Multiobjective Optimization of VLSI Interconnect Parameters, IEEE Transaction on Computer-Aided Design, 1998, 17 (12): 1252—1261.
- [2] E. Korczynski, Low- k Dielectric Integration Cost Modelling, Solid State Technology, 1997, 40(10): 123—128.
- [3] ANSYS User's Manual for Revision 5.4, Swanson Analysis Systems, Inc. 1994.
- [4] B. Shieh, K. Saraswat, M. Deal and J. McVittie, Air Gaps Lower k of Interconnect Dielectrics, Solid State Technology, February, 1999, 51—58.
- [5] B. P. Shieh, L. C. Bassman, D. K. Kim, K. C. Saraswat, M. D. Deal and J. P. McVittie, Integration and Reliability Issues for Low Capacitance Air-Gap Interconnect Structures, IEEE IITC, 1998, 125—127.
- [6] R. Streiter, H. Wolf, U. Weiss, X. Xiao and T. Gessner, Optimization of ULSI Interconnection Systems Including Aerogels by Thermal and Electrical Simulation, Proceedings of Advanced Metallization Conference 1999, MRS, 2000, 335—342.
- [7] RUAN Gang, LIANG Qinglong, R. Streiter, SONG Renru, T. Otto and T. Gessner, Semiconductor Technology, 2000, 25(1): 53—56(in Chinese)[阮刚,梁庆龙, R. Streiter, 宋任儒, T. Otto, T. Gessner, 半导体工艺, 2000, 25(1): 53—56].
- [8] X. Xiao, R. Streiter, G. Ruan, R. R. Song, T. Otto and T. Gessner, Modeling and Simulation for Dielectric Constant of Aerogel, Microelectronic Engineering, 2000, 54(3—4): 21—27.
- [9] Stanley Middleman, An Introduction to Mass and Heat Transfer, John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [10] RUAN Gang, XIAO Xia and ZHU Zhaomin, ACTA ELETRONICA SINICA, 2000, 28(11): 84—87(in Chinese) [阮刚,肖夏,朱兆旻,电子学报, 2000, 28(11): 84—87].

Simulation of Thermal Performance of ULSI Interconnect System

RUAN Gang¹ and XIAO Xia²

(1 ASIC and System State Key Laboratory, Fudan University, Shanghai 200433, China)

(2 Center of Microtechnology, Technical University of Chemnitz, Chemnitz D-09107, Germany)

Abstract: The thermal performance for a multi-objective electrical optimized five-layer metallization interconnect structure of 0.15 μm generation ULSI circuits is simulated by using the finite element method based on software ANSYS. The thermal distribution and temperature increase of this interconnect system are obtained for Al and Cu metallization with different dielectric materials (SiO_2 or low k dielectric xerogel). The simulation results are compared with the results from Stanford University for another five-layer metallization interconnect. The influences of the employment of low k dielectric on the heat dissipation of the metallization interconnect system are discussed. The features of ANSYS are briefly introduced, especially its advantages on thermal simulation.

Key words: ULSI interconnect; xerogel; thermal performance simulation

EEACC: 2570

Article ID: 0253-4177(2001)08-1081-06

RUAN Gang male, was born in 1935, professor, tutor of PhD candidate. His main research interests are in the modeling and simulation of ULSI process, devices and circuits.

XIAO Xia, femal, was born in 1971, PhD candidate of Technical University of Chemnitz, Germany. Her main research interests are in the electrical and optical interconnect of ULSI.

Received 2 September 2000, revised manuscript received 26 December 2000

©2001 The Chinese Institute of Electronics