

基于有限元分析的集成电路瞬态热模拟

苏 蓉, 郭春生, 冯士维, 张 斌, 张光沉
(北京工业大学 电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

摘 要: 结合 EDA 软件 Cadence 及目前常用的有限元分析软件 ANSYS 模拟了芯片的瞬态热效应. 将从电路仿真软件中得到的电学参数作为 ANSYS 软件的载荷, 加载到从 ANSYS 中建立的热模型上, 对芯片的瞬态工作状态进行了热仿真, 模拟芯片工作时的瞬态温度分布. 针对一个简单集成电路进行芯片级的瞬态热分析, 通过调整热载荷脉冲时间得到了此电路的热时间常数; 模拟了同一频率不同占空比下电路的热响应情况; 模拟了相同时间、相同占空比、不同频率下电路的热响应情况.

关键词: 集成电路; 瞬态热分析; 芯片最高温升; 脉冲占空比

中图分类号: TN406

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)05-0074-04

Transient Thermal Analysis of ICs Based on FEM

SU Rong, GUO Chun-sheng, FENG Shi-wei, ZHANG Bin, ZHANG Guang-chen

(School of Electronic Information & Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Combining EDA tools Cadence and a well established commercial simulation program based on finite element method ANSYS, this paper simulates the transient thermal effect of integrated circuit on layout-level. After obtaining electronic parameters especially power dissipation of the circuit, the transient temperature distribution is calculated by loading them into the thermal subsystem established by ANSYS. Based on a simple integrated circuit, we obtain the thermal time constant by adjusting the pulse-length, and simulate the thermal response under pulse with the same frequency and the same duty ratio but different duty ratio and different frequency.

Key words: integrated circuit; transient thermal analysis; the highest temperature rise; pulse duty ratio

1 引言

随着芯片向高集成度、高速高频、超高 I/O 端子数的方向发展, 芯片特征尺寸越来越小, 元件封装密度也越来越高, 单位面积功耗迅速上升, 使芯片温度也越来越高. 芯片上温度的不均匀会导致热斑、热奔等热效应, 从而使芯片烧毁^[1-2]. 集成电路的热设计和热特性评估成为近年来重要话题之一. 在极端恶劣的工作环境下, 比如炎热的沙漠、高温的生产现场、苛刻的航天环境等等, IC 芯片的温升问题就尤其突出, 电子系统的可靠性问题相比其他问题而言往往就具有了压倒性的重要意义^[3]. 热分析同信号完整性分析、功率分析一样成为集成电路分析中不

可缺少的部份^[4]. 国内外所做研究工作有动态热分析^[5]、稳态热分析^[6]、电热耦合模型的分析^[7-11]、集成电路中互连线的热分析^[12-13]和芯片封装热模拟等几个方面^[14].

然而这些研究关注的多是芯片封装后的热分析, 为了在流片之前给 IC 设计工程师提供一些优化电路的建议, 文中首次对芯片瞬态工作状态进行了热仿真并得到其芯片级的温度分布. 针对一个简单集成电路进行芯片级的瞬态热分析, 通过调整热载荷脉冲时间仿真得到了此电路的热时间常数; 模拟了同一频率不同占空比下电路的热响应情况; 模拟了同一时间内、同一占空比、不同频率下电路的热响应情况.

收稿日期: 2009-03-13; 修回日期: 2009-05-13

基金项目: 北京工业大学校青年基金项目(X1002013200801); 北京工业大学博士启动基金项目(X0002013200802)

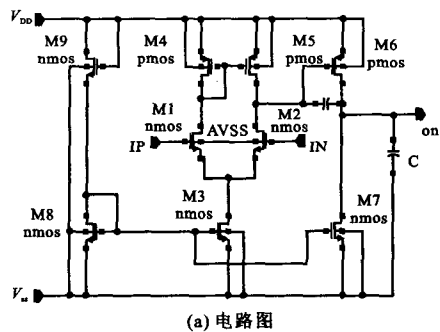
2 仿真过程

获取集成电路的瞬态热-电情况是一个复杂的工程,建立热模型后,有限元分析软件 ANSYS 需要在获得温度分布的同时获取相应的时间。

2.1 模型建立

一个集成电路实际是由电学子系统和热学子系统共同组成的。电学子系统由电学元件如晶体管、电阻等连接而成,热学子系统由芯片本身及其封装构成。两个系统相互耦合:电学元件的功耗作为热学网络的热源,而热学网络中不同温度值作为参数会影响电学系统中元器件及其性能^[15-16]。

文中所分析电路的电学系统的搭建是借助 Cadence 的 schematic 及 virtuoso 完成的,如图 1 所示。所用的电学参数是功耗,其获取则可以用 Cadence 的 spectre 或其他电路仿真工具。电路工作时电路中每一个 MOS 管的管功耗与 MOS 管有源区面积的比值热流密度将作为热载荷加载到热学系统中。



(a) 电路图



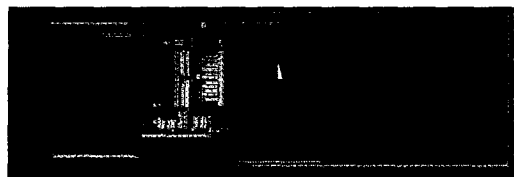
(b) 版图

图 1 文中所用电路

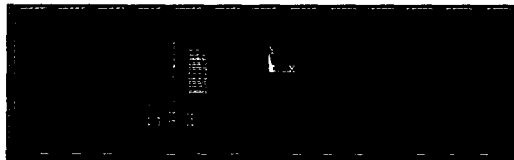
有限元分析软件 ANSYS 的作用是解热传导方程从而得到温度分布,在 ANSYS 环境下建立热学系统。本次实验的对象是芯片级的热仿真,版图的输出文件(GDS II 文件)不能够直接导入到 ANSYS 中以帮助建立热分析模型,于是应用 LinkCAD for ANSYS 将版图输出文件(GDS II 文件)转换为 ANSYS 可直接导入的文件(ANF 文件)。

本次实验中,LinkCAD for ANSYS 的输入文件是已设计好的电路版图文件(.gds),输出的文件是 ANF 文件。转换的结果如图 2(a)所示,此版图具有多个掩模层,并用不同的颜色加以标识,得到一个二维图。基于 MOS 器件的发热区位于沟道部分,即版

图中各个 MOS 的沟道区即版图文件中有源区和多晶硅重合的区域,这可以在 ANSYS 中通过布尔运算获得。由于本电路的版图所采用的是 $0.6\mu\text{m}$ CMOS 工艺,这种工艺下,互连线自热现象对整个电路自热贡献较小,因此建模时忽略互连线。另外实验的模型应该是三维的芯片模型,又在上一步骤的基础上进行操作,将面扩展为体,同时还需建立芯片的整体模型。故将热模型简化为几何模型近似为一个大的几何体中嵌套了许多小的几何体,如图 2(b)所示。模型建立完成。



(a) 转换到 ANSYS 界面下的版图



(b) 转换到 ANSYS 界面下建立的热模型

图 2 版图与热模型

2.2 仿真过程

模型建立完成后,需要定义材料的物理参数。由于本实验是对瞬态热响应的仿真,于是需要定义比热容、热导率、密度,查表知 Si 的比热容为 $741\text{J/kg}\cdot\text{K}$,热导率为 $145\text{W/m}\cdot\text{K}$,密度为 2328kg/m^3 ,其中热导率定义为各向同性。

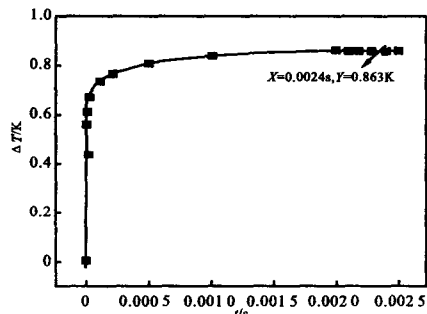
另外,针对芯片级仿真,假设芯片处于理想的散热环境中,即底部贴了温度恒为 300K 的理想热沉,且周围环境温度也为 300K 。由于发热区大约位于上表面下 $1\mu\text{m}$ 附近,而芯片的厚度大约为 $300\mu\text{m}$,为了便于观察芯片的热响应,近似认为小的几何体的上表面为发热区。

在本次仿真中,热载荷是以脉冲的形式加载的,即一个周期内,脉冲到来时为升温过程,没有脉冲时即为散热过程。脉冲来临时,同稳态热分析一样,划分网格后进行加载热载荷,加入热载荷为热流密度,区别是计算时需要定义此次计算为瞬态,并定义此次脉冲的持续时间,进行计算。撤掉脉冲后的散热过程不需要加载热流密度,而是将上一次脉冲加载后的温度分布作为初始条件引入到本次计算中,同时定义散热时间即可获得散热后温度分布。以此类推,可以计算出若干个周期后的芯片上的温度分布。

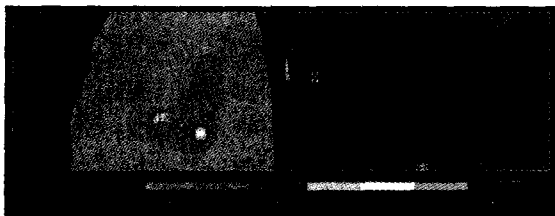
3 仿真结果

3.1 热时间常数的获得

当元器件刚刚通过电流时,大部分功耗用来使其自热温升,但随着器件的温度逐渐增强,向周围环境的散热逐渐增强,最后,器件的功耗完全通过散热过程消耗掉,元器件的温度就不再变化,达到稳态状态.就是说,在稳定状态下,器件耗散的电功率等于单位时间器件散掉的热量,即当温度不再上升时,就达到稳态.基于上述原理可以调整热流密度的加载时间从而得到芯片到达稳态的时间,即热时间常数.对本次仿真的电路热时间常数及达到稳态后的温度分布如图 3 所示.图 3(a)中, ΔT 表示片上最高温升, t 表示脉冲加载时间.由于电路规模较小,且仿真环境为理想散热环境,片上最高温升较低,只有 0.863K.



(a) 该电路的热时间常数



(b) 达到稳态后的温度分布

图 3 该电路的热时间常数及达到稳态后的温度分布

3.2 不同占空比下的热响应

相同频率不同占空比下芯片的热响应是不同的.显然,占空比较小时,电路升温时间短,同一周期内片上最高温升的最大值小,散热时间较长,积累温升较低;反之,占空比较大时,电路升温时间长,同一周期内片上最高温升的最大值大,散热时间短,积累温升较高.所以占空比小时,温升低的同时温度梯度也小,有利于器件的可靠性.

文中选择了四个不同占空比,对电路进行了热仿真.为了对比,模拟了每个占空比下,四个周期内的热响应,其中周期为 2×10^{-9} s,如图 4 所示.其中 ΔT 表示片上最高温升, N 表示周期数.为了看到明

显的片上最高温度上升及下降曲线,仿真中芯片工作的频率较高为 500MHz.可以看出占空比较大时,片上最高温升的最大值及积累温升大.同时还给出了占空比为 1:1 时第一个周期的内脉冲加载时的温度分布以及散热时电路的温度分布变化图,在第一周期内提取了五个时间点的温度分布,分别为 0 个、1/4 个、1/2 个、3/4 个和 1 个周期,它们对应的最高片上温升分别为 0K、0.191K、0.255K、0.1K 和 0.062K.为了观察清楚,这里只截取了有源器件即发热器件区域,如图 5 所示.

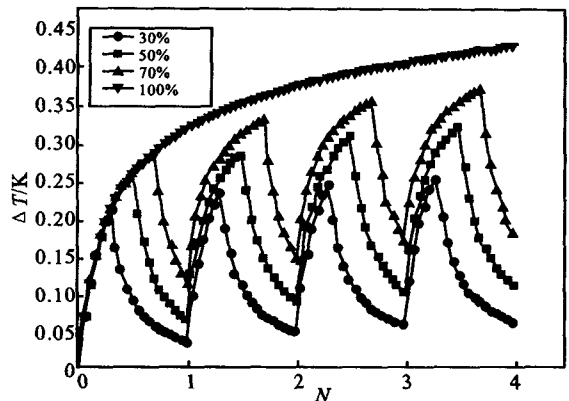


图 4 不同占空比的热响应曲线



图 5 第一周期内温升的渐变图

3.3 不同频率下的热响应

在高频电源电路中,频率越高,得到的输出越稳定.为此模拟了不同频率下芯片的热响应,它们的占空比为 1:1,频率分别 250MHz、100 MHz、50 MHz,之所以选择这么高的频率是为了让温度响应曲线上每一个子步的温升都较均匀,从而易于观察.图 6 中模拟了 $0.06\mu\text{s}$ 内,不同频率下片上最高温度的变化曲线图.明显看出虽然 $0.06\mu\text{s}$ 结束后高频的片上最高温度累计升温最高,但最高温升的最大值出现在频率较低的热响应曲线上;同时,高频时其最高温升的梯度较小,器件工作在相对稳定的温度环境中,芯片的可靠性也应该最好,如图 6 所示,其中 ΔT 表示片上最高温升, t 表示脉冲加载时间.

3.4 结论

针对一个放大电路的瞬态芯片级热模拟,得到如下结论:(1) 在瞬态热响应仿真中,通过调整热载荷加载时间可以得到电路的热时间常数,文中电路的热时间常数约为 0.0024s;(2) 在相同频率不同占

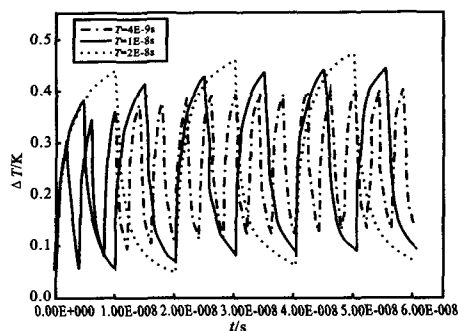


图6 不同频率下的热响应曲线

空比下的热响应曲线,很明显,该电路中脉冲宽度调小20%,片上最高温升就可以降低一半左右,且温度梯度小;(3)基于高频电源对频率的要求,模拟了高频下电路的工作状态.结果表明,虽然 $0.06\mu\text{s}$ 结束后高频的片上最高温度累计升温最高,但最高温升的最大值出现在频率较低的热响应曲线上;且由于高频时其温度梯度较小,芯片中器件的工作环境越稳定,有利于芯片的可靠性.

值得注意的是:由于初次模拟电路芯片级的瞬态热效应以及 ANSYS 的局限性,文中只对一个简单集成电路进行了芯片级的热仿真;假设电路所处环境为理想散热环境 300K,上述两项原因导致片上最高温升较低.下一步,将进行规模较大集成电路的瞬态热仿真.

4 结束语

文中着眼于流片前芯片的热分析,结合电路仿真软件 Cadence 的 spectre 及目前常用的有限元分析软件 ANSYS,以一个放大电路为例,通过 ANSYS 建立了芯片的瞬态模型,结合边界条件做了电路芯片级仿真,模拟了其芯片级瞬态热效应,并给出了芯片温升和占空比以及频率的定性关系.

参考文献:

- [1] Vladimir Szekely, Marta Rencz, Andras Pahi. Thermal monitoring and testing of electronic systems[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technology, 1999, 22(2): 231-237.
- [2] Nicclo Rinaldi. On the modeling of the transient thermal behavior of semiconductor devices[J]. IEEE Transaction on Electron Devices, 2001, 48(12): 2796-2802.
- [3] 王俭,施教芳,林志浩. CPU 芯片温升与其使用率关系研究[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(6): 45-47.
- [4] 孙静莹,冯士维,李瑛,等. 集成电路芯片级的热分析方法[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(7): 87-91.
- [5] Ting-Yuan Wang, Chen C C P. Thermal-ADI-a linear-time chip-level dynamic thermal simulation algorithm based on alternating-direction-implicit (ADI) method[J]. IEEE Trans. on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2003, 11(4): 691-700.
- [6] Bougataya M, Lakhsas A, Savaria Y, et al. Mixed fluid-heat transfer approach for VLSI steady state thermal analysis [C]// Electrical and Computer Engineering. Canadian, 2002: 403-407.
- [7] Lee S, IlstotD A. Electrothermal simulation of integrated circuits[J]. IEEE J Sol Sta Circ, 1993, 12(28): 1283-1293.
- [8] Digele G, Lindenkreuz S, Kasper E. Fully coupled dynamic electro-thermal simulation[J]. IEEE Trans. On Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 1997, 5(3): 250-257.
- [9] Sabry V A MN, Bontemps A, Vahrman R. Realistic and efficient simulation of electro-thermal effects in VLSI circuits[J]. IEEE Trans. on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 1997, 5(3): 283-289.
- [10] Petegem W, Geeraerts B. Electrothermal simulation and design of integrated circuits[J]. IEEE J Sol Sta Circ, 1994, 29(2): 143-146.
- [11] Swart N R, Nathan A. Coupled electrothermal modeling of microheaters using SPICE [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1994, 41(6): 920-925.
- [12] Ting-Yen Chiang, Banerjee K, Saraswat K C. Effect of via separation and low-k dielectric materials on the thermal characteristics of Cu interconnects[C]// Electron Devices Meeting. Stanford, 2000: 261-264.
- [13] Ajami A H, Banerjee K, Pedram M. Modeling and analysis of nonuniform substrate temperature effects on global ULSI interconnects[J]. IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2005, 24(6): 849-861.
- [14] Lee C C, Palisoc A L, Min Y J. Thermal analysis of integrated circuit devices and packages[J]. IEEE Trans. On Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1989, 12(4): 701-709.
- [15] 王乃龙,张盛,周润德. 基于电热模拟的电迁移可靠性诊断及时钟完整性分析[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2004, 44(7): 984-987.
- [16] 王乃龙,刘森,周润德. 用有限差分法实现集成电路的电热耦合模拟[J]. 微电子学, 2004, 34(3): 295-297.

作者简介:

苏蓉女, (1984-), 硕士研究生. 研究方向为集成电路的热分析.