

TSV 互连结构传输性能分析及故障建模研究

尚玉玲¹, 钱 伟¹, 李春泉², 豆鑫鑫¹

(1 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

2 桂林电子科技大学 机电工程学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 随着集成电路复杂度的提高以及半导体制造工艺水平的不断发展, 硅通孔(Through Silicon Via)TSV 技术成为三维集成电路的一种主流互连技术, 建立单个 TSV 的三维物理模型, 通过回波损耗来分析不同物理参数和尺寸变化对信号传输性能的影响; 利用硅通孔的参数提取模型对其进行 RLC 参数的提取, 并建立等效的电路模型和故障电路模型. 扫描频率在 10 GHz 范围内, 利用故障电路末端电压来分析故障的大小, 同时通过最小二乘法拟合一条根植电压曲线来判断故障大小.

关键词: 三维集成电路; 信号完整性; 硅通孔; 回波损耗; 短路故障

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2016)06—0073—05

Analysis Transmission Performance of TSV Interconnect Structure and Fault Model

SHANG Yu-ling¹, QIAN Wei¹, LI Chun-quan², DOU Xin-xin¹

(1 School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 2 School of Electromechanical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China))

Abstract: With the increasing complexity of IC and the development of the semiconductor manufacturing process, through silicon via(TSV) has become a main interconnect technology for 3D-IC. 3D physical model of single TSV is built to analyze the effect of different physical parameter and changing size on the performance of signal transmission by return loss. The parameter extraction model of TSV is adopted to obtain the parameter of RLC. Furthermore, both the equivalent circuit model and the fault circuit model are established. The value of the crack is determined by the changing terminal voltage of the fault circuit in the frequency range of 10 GHz. At the same time, the curve on judging the value of crack is estimated with the least square method.

Key words: 3D itegrated circuit; signal integrity; through-silicon-via; return loss; short fault

1 引言

当前集成电路向着高性能、高密度、高集成化发展, 三维堆叠提升了芯片的性能, 减了面积和延迟, 随着频率的升高, 信号经过 TSV 互连结构传输后出现一定的衰减, 甚至完全失真. 然而三维集成电路还处于起步阶段, 半导体制造工艺水平有限, TSV 制

作过程中会出现不可避免的缺陷. 短路缺陷主要出现在氧化层, 在 TSV 和硅衬底之间出现一个低阻, 导致传输信号出现衰减, 甚至完全失真. 根据信号的衰减程度, 可以将 TSV 分为三种, 如果短路电阻很小($<100\ \Omega$), 则认为该 TSV 是不可修复的或坏的; 如果短路电阻非常大($>20\ \text{k}\Omega$), 可以认为是无故障或者是好的 TSV; 而处于两种情况之间的就是存

收稿日期: 2015—08—02; 修回日期: 2015—09—23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51465013); 桂林电子科技大学研究生创新项目(GDYCSZ201443, GDYCSZ201480); 广西自动检测技术与仪器重点实验室主任基金(YQ15109); 广西研究生教育创新计划资助项目(YCSZ2014142)

在短路故障的,如果能够精确地测试故障大小,有利于后续的修复和生产制造过程. 在工作频率较低时,弱的短路故障对信号的传输影响可以忽略,随着频率的升高,传输信号的质量会受到较大的影响.

2 信号完整性

信号完整性^[1]广义上是描述高速电路中的信号传输质量,它主要研究互连与数字信号相互作用时电气特性参数对高速电路信号传输性能的影响. 信号传播时不断受到传输路径瞬态阻抗的影响,当传输路径阻抗不变时,信号不会被反射,而当阻抗发生改变时,就会在阻抗改变的地方发生信号反射.

其中回波损耗(S_{11})和插入损耗(S_{21})是衡量 TSV 互连结构传输性能的重要指标,也是信号完整性好坏的重要参数. 回波损耗和插入损耗分别是描述传输线信号的反射性能和正向传输性能. TSV 互连技术通过垂直方向上对芯片的堆叠,不但减小了物理尺寸,缩短了互连路径,很大程度上降低了传输中的功耗.

目前,国内外已经对 TSV 互连结构的传输特性进行了一定的研究,Soon 等^[2]研究 TSV 结构的微波特性和不同绝缘层介电常数下传输损耗的变化;Jun 等^[3]分析了 TSV 结构和材料参数改变对传输特性的影响;文献^[4]通过对 TSV 进行建模仿真,分析了 TSV 直径与间距延时和面积利用率的影响. 文献^[5]将 DRAM 和 ROM 的测试方法用于 TSV 键合前的测试. 庞诚等^[6]对 TSV 的几种电路模型进行了仿真比较,文献^[7]提出了单个硅通孔的故障模型,这些研究表明,在高频条件下,TSV 互连结构对信号传输的影响是不可忽视的. 在工艺制造中出现的故障测试直接影响到后续的加工,能够精确地判断故障的位置和大小有利于提高成品的效率,故测试成为除工艺外另一个重要的问题,而测试复杂度和测试成本是衡量测试方法的重要指标.

3 TSV 互连结构传输性能

TSV 最简单的三维模型图如图 1 所示. 它主要包括最里面的中心导体、导体外围的 SiO_2 绝缘层以及硅衬底三个部分.

对于 TSV 互连结构,不改变其他参数的条件下,将高度作为单一变量,分析 TSV 高度对信号传输性能的影响. 当硅通孔高度 H 分别为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 、 $60\text{ }\mu\text{m}$ 、 $80\text{ }\mu\text{m}$ 时,仿真结果如图 2 所示.

从图 1 所示的仿真结果可以看出,回波损耗随

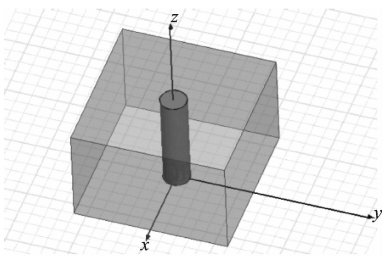


图 1 TSV 三维模型图

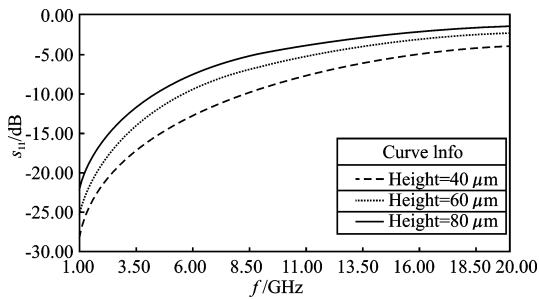


图 2 不同高度对应的回波损耗

着频率的增加逐渐增大,在频率不变时,回波损耗随着 TSV 高度的增加逐渐增大,也就是反射更严重,主要是因为高度的增加导致中心导体的阻抗变大,所以 TSV 的高度与信号传输性能成反比. 从传输性能上来说,减小 H 可以提高信号完整性. 对于生产制造和集成密度来说,并不是 TSV 高度越小越好,应结合当前的工艺水平,适当减小 TSV 高度.

绝缘层是硅通孔中非常重要的组成部分,起到将中心导体与硅衬底隔离的作用,如果绝缘层出现故障,那么会有漏电流流入到衬底中,导致信号的衰减,此外,绝缘层的厚度对信号的传输也有很大的影响. 在其他参数不变的情况下,将 SiO_2 氧化层的厚度 tox 作为单一变量,分析其对信号的影响,当 tox 分别为 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 时,仿真结果如图 3 所示.

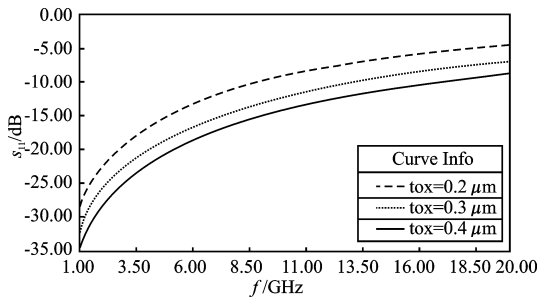


图 3 不同绝缘层厚度对应的回波损耗

从图 3 可以看出在不同扫描频率下,回波损耗随着绝缘层厚度的增加而减小,即适当增大氧化层的厚

度可以提高 TSV 互连结构的传输性能. 由于绝缘层很薄,所以在制造过程中也是非常容易出现缺陷的部分.

硅通孔的半径是一个很复杂的物理参数,几乎对等效电路中每个部分都有影响,在保证其他参数不变的条件下,把 TSV 半径作为唯一变量,分析半径改变对回波损耗的影响. 当半径 R 分别为 $5\text{ }\mu\text{m}$, $10\text{ }\mu\text{m}$, $15\text{ }\mu\text{m}$ 时,仿真结果如图 4 所示.

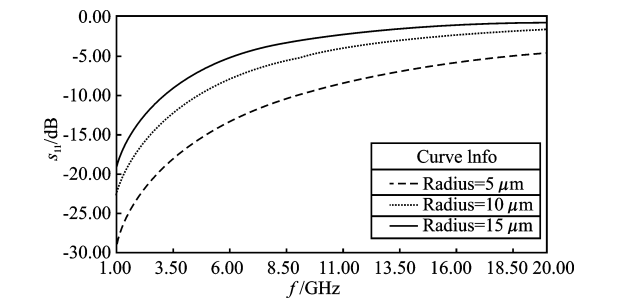


图 4 不同 TSV 半径对应的回波损耗

从图 4 可知,扫描频率不变时,随着硅通孔半径的增加,回波损耗逐渐增大. 在高频情况下,硅通孔的交流电阻也会随频率的变化而改变,由于趋肤效应的存在,改变了 TSV 表面的电流分布,越靠近导体表面,电场强度越大,这些都会导致回波损耗的增加,导致 TSV 互连结构传输性能的降低.

4 故障电路模型测试

HFSS 主要是采用有限元法,虽然 HFSS 建立三维物理模型对 TSV 传输性能的描述更加精确可靠,但是它的仿真速度较慢,需要耗费大量的计算机资源,用时较长,而且物理故障模型的建立非常麻烦;所以通过将物理模型转化为等效的 RLC 电路模型,电路仿真时间短,对计算机性能要求不高,而且能够更好地对故障进行测试.

在 TSV 制造工艺过程中,由于工艺水平有限,绝缘层短路缺陷在键合前后都容易出现缺陷. 短路缺陷主要发生在铜和硅衬底之间,也就是在氧化层,在 TSV 与地之间形成一条低阻路径,导致两层芯片之间信号的部分或全部衰减. 应针对短路故障建立等效电路模型. 趋肤效应决定了高频电阻,还会引起寄生效应,导致在高频条件下电容、电感参数的变化. 电感相对电阻来说很小,所以可以忽略不计.

硅通孔氧化层出现短路故障的等效电路图如图

5 所示.

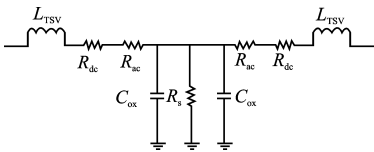


图 5 短路故障等效电路图

在低频时,由于趋肤深度远大于硅通孔半径,所以中心导体的电阻可以近似为直流电阻 R_{dc} ,随着频率的升高,趋肤效应越来越严重,导体表面的电流越来越大,导致交流电阻 R_{ac} 占主要部分,导体电阻与 TSV 的物理尺寸有直接的关系.

$$R_{dc} = \frac{\rho H_{TSV}}{\pi R_{TSV}^2} \tag{1}$$

式中, ρ 表示中心导体的电阻率 H_{TSV} 和 R_{TSV} 分别为 TSV 的高度和半径,单位为 μm .

$$R_{ac} = \frac{\rho H_{TSV}}{\pi [R_{TSV}^2 - (R_{TSV}^2 - \delta^2)]} \tag{2}$$

式中, δ 为电流密度下降为导体表面最大值的 $\frac{1}{e}$ 时的导体深度,即趋肤深度.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\pi f\mu}} \tag{3}$$

式中, f 表示信号频率, μ 为自由空间的磁导率.

等效电感为

$$L_{TSV} = (R_{TSV} - \sqrt{R_{TSV}^2 + (2H_{TSV})^2}) + \frac{\mu_0}{4\pi} [2H_{TSV} \ln(\frac{2H_{TSV} + \sqrt{R_{TSV}^2 + (2H_{TSV})^2}}{R_{TSV}})] \tag{4}$$

由于硅衬底具有一定的导电性,为了将其与 TSV 隔离,在 TSV 的外层增加一层 SiO_2 隔离层,该层会产生一个隔离层电容 C_{ox} .

$$C_{ox} = \frac{2\pi\epsilon_{ox}H_{TSV}}{\ln(\frac{R_{TSV} + t_{ox}}{R_{TSV}})} \tag{5}$$

ϵ_{ox} 和 t_{ox} 分别为二氧化硅氧化层相对介电常数和厚度. 通过在等效电路的输入端加测试激励信号,测得输出端的电压,然后将短路故障的末端电压与无故障电压进行对比分析. 其中 R_s 就是需要测试的短路故障电阻,表 1 所示为无故障时电路末端输出电压.

表 1 为无故障时不同扫描频率对应的末端输出电压

f/GHz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{in}/V	2.496	2.492	2.484	2.474	2.461	2.446	2.428	2.407	2.385	2.361

通过表 1 的数据计算出算术平均值^[8],以下单位均为 V.

$$\bar{U}=2.443\ 4,\sum_{i=1}^n(U_{oi}-\bar{U})=0$$

(6)

对数据进行有效性判定,通过式(6) 计算残余误差代数和为零,其中 $n=10$:

故无故障时末端输出电压的算术平均值和残差计算正确.

由于测得的数据可能存在系统误差,它是由固定不变或按规律变化的因素造成的. 利用贝塞尔公式和别捷尔斯公式分别计算标准差分别为

$$\sigma_1=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^nU_{oi}-\bar{U}}{n-1}}0.046\ 89$$

(7)

$$\sigma_2=1.253\frac{\sum_{i=1}^n(U_{oi}-\bar{U})}{\sqrt{n(n-1)}}=0.053\ 40$$

(8)

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2}=1+u$$

(9)

通过式(9) 计算出 $u=0.138\ 6$,由于 $|u|<\frac{2}{\sqrt{n-1}}=\frac{2}{3}$,故输出电压无系统误差.

再利用 3σ 准则判断测得值无粗大误差. 如果绝缘层出现缺陷,在短路电阻太大时,对信号的传输影响很小,可以视为好的 TSV,在短路电阻过小时,可以视为坏的 TSV,所以重点在于分析短路电阻在 $100\ \Omega<R_s<20\ \text{k}\Omega$ 之间的情况. 绝缘层短路时输出故障电压见表 2.

表 2 绝缘层短路时输出故障电压

U/V f/GHz		$R/\text{k}\Omega$									
		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2
	1	2.219	2.349	2.396	2.421	2.435	2.445	2.453	2.458	2.462	2.465
	2	2.216	2.346	2.393	2.417	2.431	2.441	2.448	2.454	2.458	2.461
	3	2.211	2.340	2.386	2.410	2.424	2.434	2.441	2.447	2.451	2.454
	4	2.203	2.331	2.377	2.401	2.415	2.425	2.432	2.437	2.441	2.444
	5	2.194	2.320	2.365	2.389	2.403	2.412	2.419	2.424	2.428	2.432
	6	2.183	2.307	2.352	2.374	2.388	2.398	2.404	2.410	2.413	2.417
	7	2.170	2.292	2.336	2.358	2.372	2.381	2.387	2.392	2.396	2.399
	8	2.156	2.275	2.317	2.339	2.353	2.362	2.368	2.373	2.377	2.380
	9	2.140	2.256	2.297	2.319	2.332	2.340	2.347	2.351	2.355	2.358
	10	2.122	2.235	2.276	2.296	2.309	2.317	2.323	2.328	2.332	2.334

以无故障电压作为参考电压, $U_{ki}=U_{oi}-U$,其中 U_{ki} 表示在相同频率下无故障电压与短路故障电压的差值,再对每一列电压差值进行求平方和,计算对应的根植电压:

$$U_k=\sqrt{\sum_{i=1}^{10}U_{ki}^2}$$

(10)

通过式(10)计算得到每一列的差值电压平方和对应的根植电压如表 3 所示.

表 3 绝缘层短路故障根植电压

$R/\text{k}\Omega$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
U_k/V	0.829 5	0.437 9	0.297 3	0.224 8	0.181 2	0.151 7	0.130 4	0.114 0	0.101 7	0.091 8

通过 matlab 曲线拟合函数进行最小二乘法进行曲线拟合,首先从低级开始,不断提高拟合阶数来观察拟合效果,选取得到一条与实际曲线最接近的一条拟合曲线,得出拟合函数. 当 $n=5$ 时,取到一条拟合效果比较好的曲线.

$$y=-0.448x^5+2.898\ 8x^4-7.274\ 2x^3+8.924\ 8x^2-5.547\ 6x+1.633\ 5.$$

图 6 所示为根植电压原始曲线和对应的拟合

曲线.

为验证拟合结果的有效性,选取拟合值为 0.187 3,此时的相对误差为 3.37%,所以拟合曲线的相对误差基本小于 4%,与实际值很接近,因此拟合结果有效.

5 结束语

TSV 互连结构已经成为三维集成电路中重要的

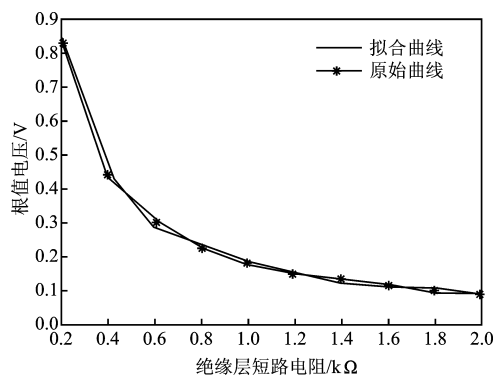


图 6 绝缘层故障拟合效果图

互连方式,其高频条件下的信号完整性已经成为不容忽视的问题。随着频率的升高,趋肤效应的影响是相当大的,传输性能也越来越差。本文针对 TSV 互连结构物理模型建立了等效电路,在等效电路的基础上建立故障模型,通过故障电压检测,以对应频率下无故障电压为基准,以最小二乘法方差平方和最小为准则,可以有效地区分低频率大故障和高频率小故障出现的误测试问题,尤其对微小故障比较适用。

参考文献:

- [1] BOGATIN E. 信号完整性分析[M]. 李玉山,李丽平,译. 北京:电子工业出版社,2005:74-151.
- [2] HO S W, Yoon S W, Zhou Q E, et al. High RF performance TSV silicon carrier for high frequency application [C]// Proceedings of 58 th Electronic Components and Technology Conference. New York, USA: IEEE, 2008: 1946-1952.
- [3] Pak J S, Ryu C, Kim J. Electrical characterization of

through silicon via (TSV) depending on structural and material parameters based on 3D full wave simulation [C]// Proceedings of International Conference on Electronic Materials and Packaging. New York, USA: IEEE, 2007: 1-6.

- [4] 李琰. TSV 建模与耗散分析 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [5] 蒋剑锋,赵振宇,邓全,等. 3DSRAM 中的 TSV 开路故障模型研究[J]. 计算机工程与科学, 2014, 36(12): 2331-2338.
- [6] 庞诚, 王志, 于大全. TSV 结构的几种 SPICE 模型仿真[J]. 半导体技术, 2013, 38(10): 770-775.
- [7] Chen Po-yuan, Wu Cheng-wen, Kwai Ding-ming. On-chip testing of blind and open-sleeve TSVs for 3D IC before bonding[C]// Proceedings of 28th IEEE VLSI Test Symposium. Santa Cruz, USA: IEEE, 2010: 263-268.
- [8] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

作者简介:

尚玉玲 女, (1977-), 博士, 副研究员. 研究方向为集成电路测试、信号完整性分析方面的研究.

钱伟 男, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为信号完整性分析研究.

李春泉(通讯作者) 男, (1975-), 博士后, 教授, 硕士研究生导师. 研究方向为微电子制造工程、先进制造技术、信号完整性分析研究, E-mail: lichunquan@gmail.com.

豆鑫鑫 男, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为信号完整性分析研究.

(上接第 72 页)

- [2] Deepali Virmani, Tanu Sharma, Ritu Sharma. Adaptive energy aware data aggregation tree for wireless sensor networks[J]. International Journal of Hybrid Information Technology, 2013, 6(1): 26-36.
- [3] ShanLiqun, Wang Jinkuan, Du Ruiyan, et al. Multipath data aggregation routing in wireless sensor networks[J]. Advances in Information Sciences and Service Sciences, 2012, 4(8): 344-351.
- [4] Sinha Adwitiya, Lobiyal D K. Data aggregation in wireless sensor networks using ant colony algorithm [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2008, 31(4): 387-401.
- [5] Liu Binghong, Jhuang Yinghong, Tung Liping, et al. An improved method of constructing a data aggregation tree in wireless sensor networks[C]// ICGEC 2012. Washington:

IEEE Computer Society, 2012: 344-347.

- [6] Yilmaz Onur, Demirci Sercan, Kaymak Yagiz, et al. Shortest hop multipath algorithm for wireless sensor networks[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2012, 63(1): 48-59.
- [7] 姚仲欢,王高才,孙野,等. 传感器网络中基于最短路径树的低延时节能路由算法[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(9): 174-177.
- [8] 殷新春,徐力杰. WSN 中一种基于数据融合的能量高效分簇路由协议[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(9): 116-119.

作者简介:

李丽 女, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为无线传感器网络. E-mail: lili0855@163.com.

降爱莲 女, (1969-), 博士, 副教授. 研究方向为无线传感器网络.