

TSV 封装中阻抗不连续差分互连结构 宽频寄生参数建模研究

孟 真, 刘 谋, 张兴成, 郭希涛, 阎跃鹏

(中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘 要: 为了研究 TSV 封装内除差分对硅通孔外在硅基片的层间和层下存在的微凸点、平面互连线、倒装焊球等互连结构对差分信号传输特性的影响, 提出了一种改进型的适用于描述 TSV 封装内“串连型差分互连阻抗”的差分对硅通孔结构的 RLCG 电路模型, 进而提出了一种采用“阻抗不连续系数”来描述串行连接的微凸点、平面互连线、倒装焊球等结构的“串连式阻抗不连续结构”RLCG 电路模型. 在此基础之上, 采用 HFSS 三维全波仿真方法对 TSV 封装中的硅通孔、微凸点、平面互连线、倒装焊球等差分对互连结构的各种串行连接方式进行了三维电磁场建模和分析. 将 RLCG 模型的差模正向传输系数与 HFSS 模型的分析结果进行了对比, 对比结果证明在 0.1~30 GHz 特别是 3~25 GHz 宽频段内本文提出的上述 2 种 RLCG 电路模型能够较为准确的描述出差分互连结构的差模信号宽频传输特性.

关键词: TSV 封装; 差分对 TSV 结构; 串连型差分互连阻抗; 串连式阻抗不连续结构; 阻抗不连续系数; RLCG 电路模型; HFSS 模型

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)08-0006-06

Broadband Parasitic Parameters Modeling of Impedance Discontinuous Differential Pair Interconnect Structure in the TSV Package

MENG Zhen, LIU Mou, ZHANG Xing-cheng, GUO Xi-tao, YAN Yue-peng

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to research the influence on the differential transmission characteristics caused by micro-bump, planar interconnector, flip-chip solder ball and other interconnect structures except for the through silicon via in the TSV package, an improved RLCG circuit model of the differential TSV, which is suitable for describing the "impedance of the differential interconnect structures connected in series" is proposed. Then, a RLCG circuit model of the "impedance discontinuity structure connected in series" which is suitable to describe the micro-bump, planar interconnector, flip-chip solder ball and other interconnect structures used "impedance discontinuity coefficient" is proposed. On this basis, 3D full wave simulation method of HFSS is used to simulate the structure made up of the micro-bump, planar interconnector, flip-chip solder ball and other interconnect structures connected in series. The differential mode forward transmission coefficient of the RLCG model and HFSS model are analyzed and compared. The results show that two RLCG models proposed above can describe the wideband transmission characteristics of differential mode signals accurately in the 0.1~30 GHz, especially in the 3~25 GHz wave band.

Key words: TSV package; differential TSV structure; impedance of the differential interconnect structures connected in series; impedance discontinuity structure connected in series; impedance discontinuity coefficient; RLCG circuit model; HFSS model

1 引言

TSV(Through-Silicon-Via)封装技术是在垂直叠层裸片之间直接制作垂直导通孔,以实现芯片之间的互连.该封装技术能够使芯片在三维方向实现最大密度的堆叠,是集成电路高密度集成的一个重要的发展方向^[1-2].

随着数据处理和传输速率不断提高,差分结构已取代单端结构成为数字电路中最通用的高速信号传输载体,差分对互连结构也将会是 TSV 封装中的一种必须的互连结构^[3].与模拟信号不同数字信号的波形非正弦波而是矩形波或类矩形波,为保证 TSV 封装内集成的 CPU、内存等裸片之间良好的信号传输,就要求 TSV 封装内互连结构能够在 0~30 GHz 甚至更大带宽内均具有良好的传输性能.

现有研究主要针对单层硅基片内的单层硅通孔结构,而 TSV 封装中完整的信号传输路径中还存在着其它多种与硅通孔结构不同的互连结构,它们的特性阻抗与硅通孔结构是不同的.

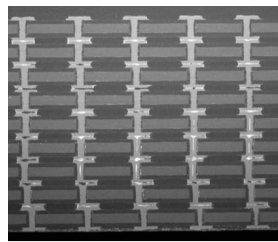
本文针对 TSV 封装中与差分对硅通孔结构的阻抗存在不连续的互连结构进行了全面研究.

2 阻抗不连续差分互连结构

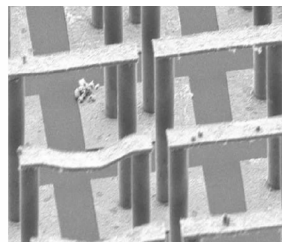
由于信号连通的需要,TSV 封装内部除去垂直纵向穿过硅基片的硅通孔结构外,还存在其它的互连结构.如图 1(a)所示,Chuen-De Wang、Joohee Kim, J. K 等在文中给出了多层硅通孔垂直互连时需要的层间微凸点(Micro-Bump)结构的显微照片^[4-5].如图 1(b)所示,Guruprasad Katti 等在文中给出了在硅基片层间平行方向上的平面互连线结构的显微照片^[6].如图 1(c)所示,Hui Min Lee 等在文中给出了在硅基片层下的平面互连线以及倒装焊球的显微照片^[7].上述这些互连结构的构造与尺寸均与硅通孔是不一致的,致使其阻抗与硅通孔的阻抗存在明细差异,从而对信号的传输特性造成影响.特别对于高速差分数字信号,由于其所包含的频率分量带宽更宽,这种阻抗不连续会对其造成更大的影响.图 1(d)给出了一个典型的 TSV 封装中可能会集成的各种差分对互连结构.

3 差分对 TSV 结构的混合 S 参数描述方式

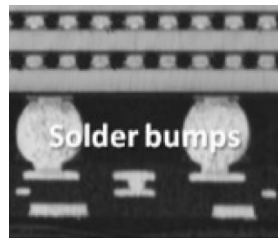
一个差分对 TSV 结构的物理端口数为 4 个,可以用一个标准 4 端口 S 参数描述其分布参数.但是在差分工作状态下的差分对结构其每个端口都包含



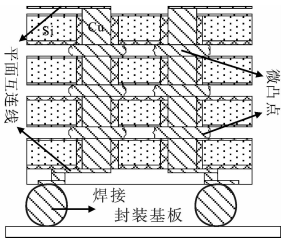
(a)层间微凸点结构



(b)平面互连线结构



(c)平面互连线及倒装焊球结构



(d)一个典型的 TSV 封装中的差分对互连结构

图 1 TSV 封装中各种阻抗不连续互连结构

有差模和共模响应,因此标准 4 端口 S 参数无法描述差分信号传输中的差模、共模以及差模-共模转换响应等特性. David E. Bockelman 以及 W. Fan 等人提出了 2 端口混合模式 S 参数来描述差分组件的电学特性^[8-10].标准 4 端口 S 参数矩阵 $[S]$ 与混合模式 S 参数矩阵 $[S^{mix}]$ 之间存在如下关系^[9-12]:

$$[S^{mix}] = M \cdot [S] \cdot M^{-1} \quad (1)$$

$$M = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

可以得到,2 端口混合 S 数的差模激励-差模响应矩阵与标准 4 端口 S 参数之间的转换关系如下:

$$[S_{dd}^{mix}] = \begin{bmatrix} S_{dd11} & S_{dd12} \\ S_{dd21} & S_{dd22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} S_{11} - S_{21} - S_{12} + S_{22} & S_{13} - S_{23} - S_{14} + S_{24} \\ S_{31} - S_{41} - S_{32} + S_{42} & S_{33} - S_{43} - S_{34} + S_{44} \end{bmatrix}$$

本文在对 TSV 封装中的差分对互连结构开展的研究中,主要采用差模激励-差模响应矩阵 S_{dd}^{mix} 中的差模正向传输系数 S_{dd21} 来研究差分对互连结构的差模信号正向传输性能.

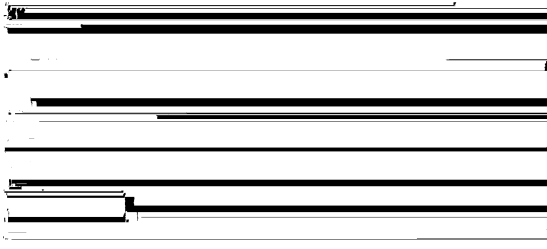
4 差分对互连结构的 RLCG 宽频寄生参数建模

4.1 单层差分对硅通孔结构的 RLCG 电路模型

本文针对 TSV 封装中的阻抗不连续问题进行研究,并主要研究各种阻抗不连续的互连对差分信

号传输特性的影响. 在 TSV 封装内部, 从某个信号源端至引出端的整个信号流传输路径中的硅通孔结构以及其它阻抗不连续结构的连接方式绝大部分是“串连型”, 即各种互连结构依次串行连接共同组成电信号的传输路径.

在文献[13-14]等的研究基础之上, 本文提出了一种改进型的适用于描述 TSV 封装内“串连型差分互连阻抗”的差分对硅通孔结构 4 端口 RLCG 电路模型. 差分对硅通孔结构的 4 端口 RLCG 模型的端口定义和电路如图 2 所示. 其中 R_{TSV} 、 L_{TSV} 为硅通孔的金属导体柱的串联电阻和串联电感, $R_{ds, TSV}$ 、 $R_{as, TSV}$ 为直流、交流电阻, $\delta_{skindepth}$ 为趋肤深度, C_{ox} 为金属导体柱与周围氧化层之间的寄生电容, C_{Si} 、 R_{Si} 为 2 个差分对金属导体柱之间的半导体硅基底所引起的寄生电容和电阻.



(a) 单层差分对硅通孔结构的模型端口定义 (b) 单层差分对硅通孔结构的 RLCG 模型

图 2 单层差分对硅通孔结构的模型端口定义及 RLCG 模型

各参数的计算公式如下:

$$R_{TSV} = \sqrt{R_{ds, TSV}^2 + R_{as, TSV}^2} \quad (4)$$

$$R_{ds, TSV} = \rho_{Cu} \frac{h_{TSV}}{\pi \left(\frac{d_{TSV}}{2} \right)^2} \quad (5)$$

$$R_{as, TSV} = \rho_{Cu} \frac{h_{TSV}}{\pi \left(\frac{d_{TSV}}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{d_{TSV}}{2} - \delta_{skindepth} \right)^2} \quad (6)$$

$$\delta_{skindepth} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_{TSV} \sigma_{TSV}}} \quad (7)$$

$$L_{TSV} = \frac{2\mu_0 h_{TSV}}{\pi^2} \cosh^{-1} \left(\frac{p_{TSV}}{d_{TSV}} \right) \quad (8)$$

$$C_{ox} = \frac{\pi^2 \xi_0 \xi_{r, SiO_2} h_{TSV}}{2 \ln \left(\frac{d_{TSV} + 2 \cdot t_{SiO_2}}{d_{TSV}} \right)} \quad (9)$$

$$C_{Si} = \frac{\pi^2 \xi_0 \xi_{r, Si} h_{TSV}}{2 \cosh^{-1} \left(\frac{p_{TSV}}{d_{TSV}} \right)} \quad (10)$$

$$R_{Si} = \frac{\pi \xi_0 \xi_{r, Si}}{2 C_{Si} \sigma_{Si}} \quad (11)$$

式中, f 为信号频率, σ_{Si} 、 σ_{Cu} 分别为 Si、Cu 的电导率, ρ_{Cu} 为 Cu 的电阻率, ξ_0 为真空介电常数, $\xi_{r, Si}$ 、 ξ_{r, SiO_2} 分别为 Si、SiO₂ 的相对介电常数, μ_0 为真空磁导率.

4.2 阻抗不连续结构的 RLCG 电路模型

由于 TSV 封装中差分信号的传输路径中硅通孔结构和阻抗不连续的微凸点、平面互连线、倒装焊球等互连结构之间是串行连接的关系. 因此在 3.1 节给出的单层差分对硅通孔 RLCG 模型基础上, 本文提出了如图 3 所示的一种“串连式阻抗不连续结构” RLCG 电路模型, 它的端口定义同图 2 (a)一致. 本模型中的提出了“阻抗不连续系数 α ”来描述各个阻抗不连续结构与单层硅通孔结构的阻抗差异程度. 在描述各种阻抗不同的互连结构串行连接后的总阻抗时, 将各个不同“串连式阻抗不连续结构” RLCG 电路模型进行串行连接即可.

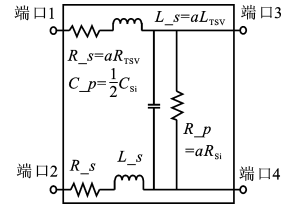


图 3 阻抗不连续互连结构的 RLCG 模型

由于单层差分对硅通孔结构 RLCG 模型中的串连电阻和电感主要由金属导体柱的串联电阻 R_{TSV} 和串联电感 L_{TSV} 描述, 因此“串连式阻抗不连续结构” RLCG 电路模型中的串联电阻 R_s 、串联电感 L_s 分别设定为金属导体柱的串联电阻 R_{TSV} 、串联电感 L_{TSV} 的函数, 它们之间的差异用“阻抗不连续系数 α ”来描述:

$$R_s = \alpha \cdot R_{TSV} \quad (12)$$

$$L_s = \alpha \cdot L_{TSV} \quad (13)$$

由于单层差分对硅通孔结构 RLCG 模型中的并联电阻主要由金属导体柱之间的半导体硅基底所引起的寄生电阻 R_{Si} 来描述, 因此“串连式阻抗不连续结构” RLCG 电路模型中的不连续结构的并联电阻设定为并联电阻 R_{Si} 的函数, 它们之间的差异用“阻抗不连续系数 α ”来描述:

$$R_p = \alpha \cdot R_{Si} \quad (14)$$

由式(10)、(11)所给出的金属导体柱之间的半导体硅基底所引起的寄生电容、电阻的反比关系, “串连式阻抗不连续结构” RLCG 电路模型中的不连续结构的并联电容设定为并联电容 C_{Si} 的函数, 它们之间的差异用“阻抗不连续系数 α ”的倒数来描述:

$$C_{-p} = \frac{1}{\alpha} C_{\text{Si}} \quad (15)$$

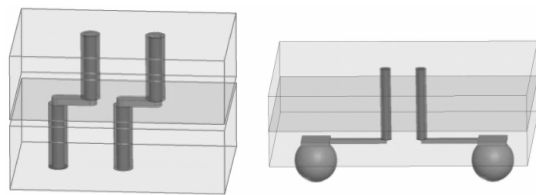
5 HFSS 三维电磁场模型与 RLCG 模型对比研究

为了验证第 3 节中提出的单层差分对硅通孔结构的 RLCG 电路模型和阻抗不连续结构的 RLCG 电路模型的正确性,本文采用 HFSS 三维全波仿真软件,在 0.1~30 GHz 宽频范围内对 TSV 封装中最为常见的差分对硅通孔、微凸点、平面互连线、倒装焊球等互连结构以及它们的组合进行三维电磁场建模.通过 HFSS 仿真结果分析这些结构的串连式组合的差模信号传输特性,以与 RLCG 电路模型的传输特性进行比对.本研究中采用混合 S 参数中的差模正向传输系数 $S_{\text{dd}21}$ 来表征差模信号传输特性.

在模型对比研究中各种互连结构的基本参数采用现阶段工业制造中常用的尺寸参数:TSV 通孔直径 20 μm ,单层 Si 片厚度 100 μm ,氧化层 SiO_2 厚度 1 μm ,差分对 TSV 的圆心间距 100 μm ,Si 片层间微凸点高度 10 μm ,Si 片层间微凸点直径 80 μm ,Si 表面平行方向 Cu 导线厚度 3 μm ,Cu 导线宽度 20 μm ,Cu 导线长度 50 μm ,倒装焊球直径 120 μm ,焊球焊盘宽度 80 μm ,焊球导线长度 160 μm .

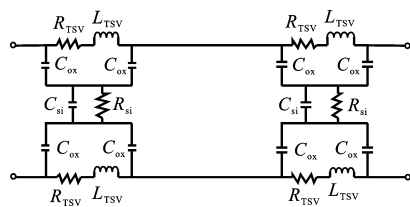
5.1 两层硅通孔之间不存在不连续结构的理想状态

如图 4(a)所示,采用 HFSS 三维电磁场仿真软件对 2 个硅通孔于垂直方向直接互连的阻抗连续结构建立了三维电磁场模型,以作为基准分析 TSV 封装中上下 2 个硅通孔之间不存在阻抗不连续结构时的状态.基于本文提出的 RLCG 建模方法,对上述结构进行了 RLCG 参数建模.图 5(a)给出了图 4(a)所述结构的 RLCG 模型.图 6(a)给出了上述两种结构的差模正向传输系数 $S_{\text{dd}21}$ 结果图.可以发现,本文提出的 RLCG 等效电路模型能够很好的拟合 HFSS 的三维电磁场仿真结果.

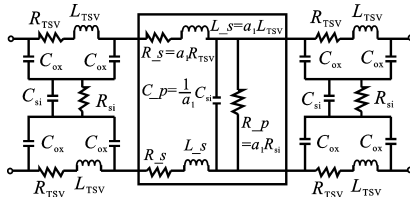


(c) 2 个垂直硅通孔经平行互连线进行互连的结构
(d) 2 个垂直硅通孔经平行互连线和倒装焊球进行互连的结构

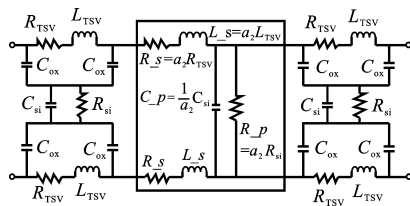
图 4 互连结构的 HFSS 模型



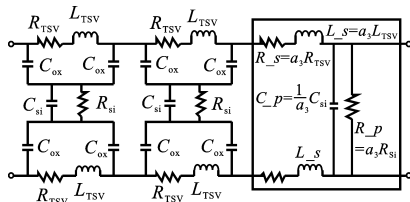
(a) 2 个硅通孔于垂直方向直接互连的阻抗连续结构的 RLCG 参数建模



(b) 2 个垂直硅通孔层间存在微凸点的结构的 RLCG 参数建模



(c) 2 个垂直硅通孔经平行互连线进行互连的结构 RLCG 参数建模

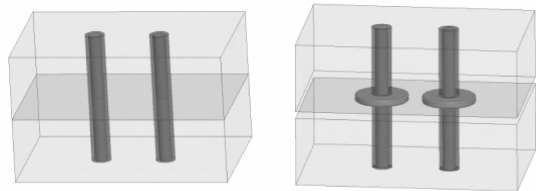


(d) 2 个垂直硅通孔经平行互连线和倒装焊球进行互连的结构 RLCG 参数建模

图 5 互连结构的 RLCG 参数建模

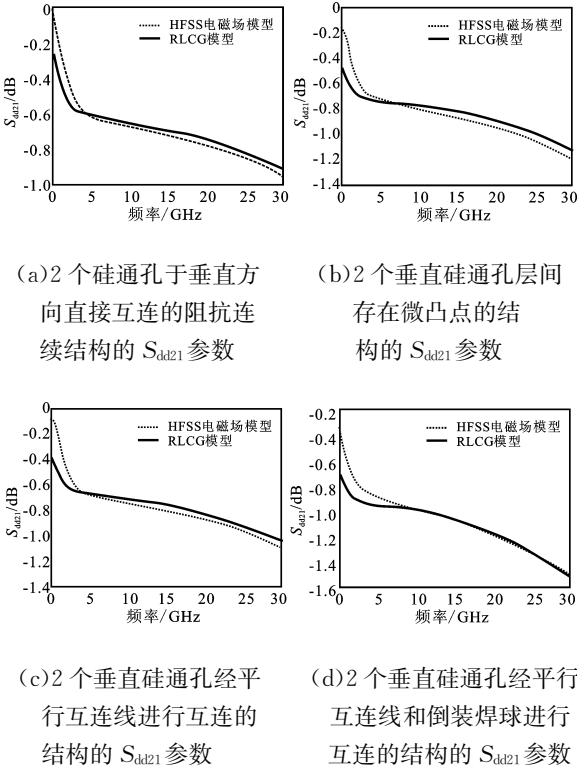
5.2 硅基板之间的微凸点结构与硅通孔之间的阻抗不连续

图 4(b)给出了真实情况中上下 2 层硅基片中的 2 个硅通孔在垂直连接时层间存在微凸点结构时的状态.以仿真分析 TSV 封装中上下 2 个硅通孔由



(a) 2 个硅通孔于垂直方向直接互连的阻抗连续结构

(b) 2 个垂直硅通孔层间存在微凸点的结构

图6 两种模型的 S_{dd21} 参数对比

于微凸点结构存在阻抗不连续时的状态. 基于本文提出的 RLCG 建模方法, 图 5(b) 给出了图 4(b) 所述结构的 RLCG 模型. 其中微凸点结构的 RLCG 模型中的阻抗不连续系数 $\alpha_1 = 3$. 图 6(b) 给出了上述两种结构的差模正向传输系数 S_{dd21} 结果图, 可以发现, 本文提出的 RLCG 模型同样能够很好的拟合 HFSS 的三维电磁场仿真结果.

5.3 平面互连线与垂直硅通孔之间的阻抗不连续

图 4(c) 给出了真实情况下硅通孔之间通过平行于硅基片的互连线进行互连时的状态. 以仿真分析 TSV 封装中某 2 层硅基片中的硅通孔结构连接硅基片中间的平面互连线时的阻抗不连续状态. 基于本文提出的 RLCG 建模方法, 图 5(c) 给出了图 4(c) 所述结构的 RLCG 电路模型. 其中平面互连线的 RLCG 模型的阻抗不连续系数 $\alpha_2 = 6$. 图 6(c) 给出了上述两种结构的差模正向传输系数 S_{dd21} 结果图, 可以发现, 本文提出的 RLCG 模型同样能够很好的拟合 HFSS 的三维电磁场仿真结果.

5.4 两个硅通孔增加底部互连线与倒装焊球后的阻抗不连续

图 4(d) 给出了真实情况下硅通孔经过下部平行于硅基片的互连线连接后再通过倒装焊球连接至底部封装基板时的状态. 以仿真分析硅基片底部的平面互连线与下方焊球引起的阻抗不连续状态. 基

于本文提出的 RLCG 建模方法, 图 5(d) 给出了图 4(d) 所述结构的 RLCG 模型. 其中底部平面互连线与倒装焊球的 RLCG 模型的阻抗不连续系数 $\alpha_3 = 1.2$. 图 6(d) 给出了上述两种结构的差模正向传输系数 S_{dd21} 结果图, 可以发现, 本文提出的 RLCG 模型同样能够很好的拟合 HFSS 的三维电磁场仿真结果.

5.5 TSV 封装中的多层硅基片复杂互连结构

图 7 给出了真实情况下 TSV 封装内 3 层硅基片通过硅通孔、微凸点、平面互连线、倒装焊球将信号从最上层硅基片连接至底部封装基板的真实信号传输状态. 以综合分析本文提出的 RLCG 模型的正确性.

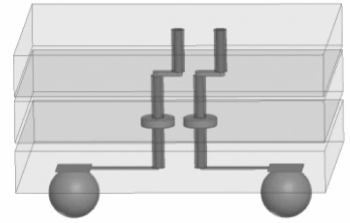


图7 三层硅基片综合互连结构

基于本文提出的 RLCG 建模方法, 对三层硅基片综合互连结构进行了 RLCG 参数建模. 图 8 给出了图 7 所述结构的 RLCG 模型. 其中微凸点结构的 RLCG 模型的阻抗不连续系数仍然设置为 $\alpha_1 = 3$, 平面互连线的 RLCG 模型的阻抗不连续系数仍然设置为 $\alpha_2 = 6$, 底部平面互连线与倒装焊球的 RLCG 模型的阻抗不连续系数仍然设置为 $\alpha_3 = 1.2$.

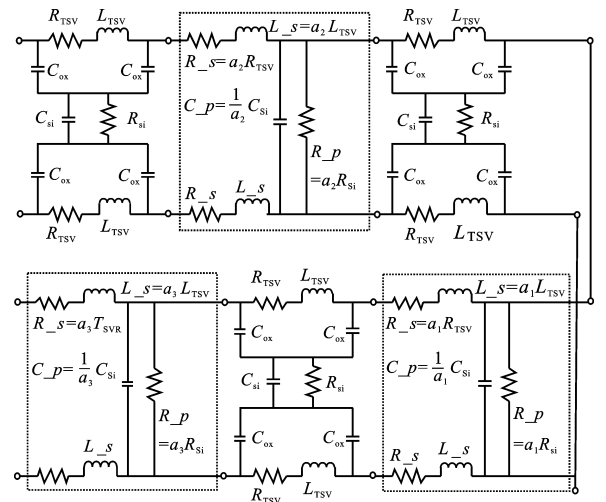
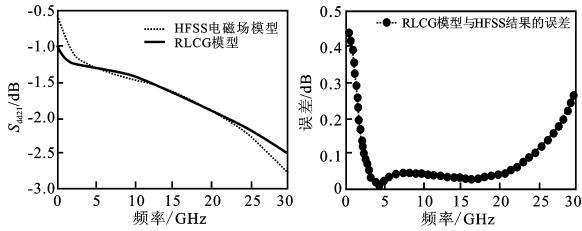


图8 三层硅基片综合互连结构的 RLCG 模型

图 9(a) 给出了上述两种结构的差模正向传输系数 S_{dd21} 结果图, 图 9(b) 给出了本文提出的 RLCG

模型与 HFSS 模型分析结果间的误差。在 1 GHz、2 GHz、3 GHz、5 GHz、10 GHz、15 GHz、20 GHz、25 GHz、30 GHz 频点处的误差分别为 0.33 dB、0.14 dB、0.04 dB、0.02 dB、0.04 dB、0.03 dB、0.04 dB、0.1 dB、0.27 dB。



(a) 三层硅基片综合互连结构的 S_{dd21} 参数

(b) 三层硅基片综合互连结构的模型间误差

图 9 三层硅基片综合互连结构的 S_{dd21} 参数及模型间误差

可以发现在集成真实 TSV 封装内部的各种阻抗不连续的互连结构后,本文提出的适用于 TSV 封装内串连式连接的阻抗不连续互连结构的 RLCG 模型能够很好的在 0.1~30 GHz 频段内拟合 HFSS 的三维电磁场仿真结果。特别在 3~25 GHz 的频段内,本文提出的 RLCG 模型能够准确的描述 TSV 封装中的阻抗不连续结构的差模信号宽频传输特性。

6 结束语

本文对 TSV 封装中的差分对硅通孔结构以及其它与差分对硅通孔结构阻抗不连续的差分对互连结构的差模电信号传输特性开展了研究。

针对差分对硅通孔结构,在现有研究基础之上提出了一种改进型的适用于描述 TSV 封装内“串连型差分互连阻抗”的差分对硅通孔结构的 4 端口 RLCG 电路模型来描述差分对硅通孔结构宽频寄生参数。针对微凸点、平面互连线、倒装焊球等与硅通孔结构阻抗不连续的互连结构提出了采用“阻抗不连续系数 α ”来描述“串连型”互连中的阻抗不连续程度,进而提出了一种“串连式阻抗不连续结构”RLCG 电路模型来描述上述不连续结构的阻抗。综合应用上述两种 RLCG 电路模型,可以对 TSV 封装中的“串连”式连接的差分互连结构的宽频电学特性进行描述。

在此基础之上,本文采用 HFSS 三维全波仿真软件,对上述典型阻抗不连续互连结构以及它们的串连式连接组合进行了三维电磁场仿真建模,将本文提出的 RLCG 电路模型与 HFSS 模型的三维全波仿真结果进行了对比。结果证明,在 0.1~30 GHz

特别是 3~25 GHz 宽频段内本文提出的 2 种适用于 TSV 封装内“串连”式互连结构的 RLCG 电路模型能够准确的描述差模信号在封装内的宽频传输特性。

参考文献:

- [1] Chuan Xu, Roberto Suaya, Kaustav Banerjee. Compact AC modeling and performance analysis of through-silicon vias in 3 D ICs [J]. IEEE Transactions on electron devices, 2010, 57(12): 3405-3416.
- [2] Biancun Xie, Kijin Han, Jianyong Xie. Coupling analysis of through-silicon via (TSV) arrays in silicon interposers for 3d systems [J]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2011, 53(1):16-21.
- [3] Nanju Na. Discontinuity impacts and design considerations of high speed differential signals in FC-PBGA packages with high wiring density electrical performance of electronic packaging [C] //IEEE 14th Topical Meeting on Electrical Performance of Electronic Packaging, 2005. [s. l.],IEEE,2005:107-110.
- [4] Wang Chuende, Lu Yichang, Chen Pengshu, et al. ABF-Based TSV arrays with improved signal integrity on 3-D IC/interposers: equivalent models and experiments [J]. IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2013, 3(10): 1744-1753.
- [5] Joohee Kim. Signal integrity modeling and measurement of TSV in 3D IC [C]//Design Automation Conference, 2013. [S. L.],IEEE, 2013: 13-16.
- [6] Guruprasad Katti, Kristin De Meyer, Wim Dehaene. Electrical modeling and characterization of through silicon via for three-dimensional ICs [J]. IEEE Transactions on electron devices, 2010, 57(1):256-262.
- [7] Hui Min Lee, Samudra GS, Er-Ping Li. Power integrity modeling, measurement and analysis of seven-chip stack for TSV-based 3D IC integration [C] //APEMC 2015, Taiwan, China, 2015:689-692.
- [8] Eisenstadt DEBaWR. Combined differential and common-mode analysis of power splitters and combiners [J]. IEEE. Trans. Microw. Theory Tech, 1995, 43(11):2627-2632.
- [9] Fan W, Wai L. Mixed-mode s-parameter characterization of differential structures [C] // Proceedings of the 5th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2003). Singapore, 2003:533-537.

(下转第 16 页)

- [6] 李成法, 陈贵海, 叶懋, 等. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议[J]. 计算机学报, 2007, 30(1): 27-36.
- [7] 缪聪聪, 陈庆奎, 曹剑伟, 等. 基于蚁群的无线传感器网络能量均衡非均匀分簇路由算法[J]. 计算机应用, 2013, 33(12): 3410-3414.
- [8] 蒋畅江, 石为人, 唐贤伦, 等. 能量均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由协议[J]. 软件学报, 2012, 34(5): 1222-1232.
- [9] Afsar M M, Younis M. An energy- and proximity-based unequal clustering algorithm for wireless sensor networks[C]//IEEE Conference on Local Computer Networks, 2014. Edmonton, Canada, 2014: 262-269.
- [10] Dorigo M, Stützgen T. 蚁群优化[M]. 张军, 胡晓敏, 罗旭耀, 等译. 北京: 清华大学出版社, 2007: 3-7.
- [11] Han J, Jian Pei, Yiwen Y. Mining frequent patterns

without candidate generation[C]// Proceedings 2000 ACM-SIGMOD Int. Conf. Management of Data, Dallas, TX, 2000: 1-12.

- [12] 顾相平, 孙彦景, 钱建生, 等. 一种改进的无线传感器网络分簇路由协议[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(3): 34-37.

作者简介:

蒋 华 男, (1963-), 博士, 教授. 研究方向为数据库系统、信息安全.

蔡振海(通讯作者) 男, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为水下无线传感器网络. E-mail: 1227921094@qq.com.

王 鑫 男, (1976-), 硕士, 副教授. 研究方向为无线传感器网络协议.

(上接第 11 页)

- [10] Eisenstadt R. Combined differential and common-mode scattering parameters: theory and simulation [J]. IEEE, Trans. Microw. Theory Tech, 1995, 43(7): 1530-1539.
- [11] Eisenstadt R. Pure-mode network analyzer for on-wafer measurements of mixed-mode S-parameters of differential circuits [J]. IEEE, Trans. Microw. Theory Tech, 1997, 45(7): 1071-1077.
- [12] Bockelman D E. The theory, measurement, and application of scattering parameters with multiple modes of propagation[D]. Gainesville, University Florida, 1997.
- [13] Jin Hu, Lifeng Jin, Hao Zheng. Electrical modeling and characterization of through silicon vias (TSV)

[J]. IEEE, 2012, 2(11): 1-4.

- [14] Lei Liang, Min Miao, Shufang Xu, et al. 3D modeling and electrical characteristics of through-silicon-via (TSV) in 3D integrated circuits [C] // 2011 International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging. Beijing, China, 2011: 471-475.

作者简介:

孟 真 男, (1983-), 博士, 副研究员. 研究方向为集成电路先进封装测试技术、高频高速微系统集成技.

E-mail: mengzhen@ime.ac.cn.