材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021050706

基于热电耦合激励的 TSV 三维封装内部缺陷识别方法研究

聂 磊，黄一凡，蔡文涛，刘梦然*

（湖北工业大学 机械工程学院，武汉 430000）

摘 要： 由于硅通孔互连(Through Silicon Via，TSV)三维封装内部缺陷深藏于器件及封装内部，采用常规方法很难检测。然而 TSV 三维封装缺陷在热-电激励的情况下可表现出规则性的外在特征，因此可以通过识别这些外在特征达到对 TSV 三维封装内部缺陷进行检测的目的。文章利用理论与有限元仿真相结合，对比了正常 TSV 与典型缺陷 TSV 的温度分布，发现了可供缺陷识别的显著差异。分析结果表明，在三种典型缺陷中，含缝隙 TSV 与正常 TSV 温度分布差异最小；其次为底部空洞 TSV，差异最大的为填充缺失 TSV。由此可知，通过检测热-电耦合激励下的 TSV 封装外部温度特征，可实现 TSV 三维封装互连结构内部缺陷诊断与定位。

关键词： TSV；有限元仿真；缺陷检测；温度云图

中图分类号： TN305.94 **文章编号：** 1001－5868(2021)05－0692－06

Research on Internal Defect Recognition Method of TSV 3D Package Based on Thermoelectric Coupling Excitation

NIE Lei, HUANG Yifan, CAI Wentao, LIU Mengran

(School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430000, CHN)

Abstract: Since the internal defects of the through silicon via (TSV) three-dimensional package are hidden deeply inside the device and the package, they are difficult to be detected with conventional methods. However, TSV 3D packaging defects can show regular external characteristics under the condition of thermo-electric excitation. Therefore, TSV 3D packaging internal defect detection can be achieved by identifying these external features. In this paper, the combination of theory and finite element simulation were used to compare the temperature distribution of normal TSV and typical defective TSV, and significant differences were presented for defect identification. The analysis results show that among the three typical defects, the difference in temperature distribution between TSV with gaps and normal TSV is the smallest, the second is TSV with bottom cavity, and the largest difference is TSV with filling missing. It can be seen that by detecting the external temperature characteristics of the TSV package under thermo-electric coupling excitation, the internal defect diagnosis and location of the TSV three-dimensional package interconnect structure can be realized.

Key words: TSV; finite element simulation; defect detection; temperature cloud map

收稿日期：2021－05－07.

基金项目：国家自然科学基金项目(51975191，51805154).

* **通信作者：**刘梦然

0　引言

在众多的三维封装技术中，硅通孔（Through-Silicon Via，TSV）以其独特的工艺特性而备受关注。它的基本思想是通过在晶片或晶片内部设置垂直导通孔，在孔中填充导电性金属，从而实现晶片的多层立体堆叠[1]。TSV 不断地向微型、高密度方向发展，但相应的技术发展不够成熟，工艺水平也不够高，往往会导致 TSV 内部产生一系列缺陷，如缝隙、底部空洞、填充缺失等[2-3]，这些缺陷会降低器件的可靠性，甚至导致器件的性能失效[4]，因此寻找一种能够准确进行内部缺陷检测的手段十分必要。

TSV 三维封装内部缺陷的检测，主要采用电测法、声学检测与光学检测。电测是一种常见的接触测试，尚玉玲等[5]通过空洞和针孔 TSV 的等效电路模型，得到开路空洞和短路针孔对应的电阻，将添加了高斯白噪声的多音信号作为测试激励信号，通过对比正常 TSV 与故障 TSV 的输出信号的峰均比，实现故障的识别与定位。声学检测通过声波经过缺陷处会导致声信号强度发生变化，从而实现缺陷检测，但该方法存在分辨率不高的问题[6]。光学测试通常采用红外光线作为入射光，由于不具备金属穿透性[6]，导致无法检测大量的 TSV 内部缺陷。除此之外，Huang 等[7]提出将机器学习应用于 TSV 内部缺陷检测，采用随机森林与 K 近邻算法实现了 TSV 空洞缺陷大小的检测，为 TSV 内部缺陷检测提供了新思路。但机器学习作为一种新型的内部缺陷检测方法，由于过于依赖数据，准确率较低。

针对目前常用方法存在的局限性，考虑到在热-电耦合激励下，TSV 三维封装系统热平衡会被打破，缺陷 TSV 会表现出与正常 TSV 异常的温度分布，若能及时准确捕捉 TSV 内部温度信号，则可以实现对缺陷的识别、定位。本文通过建立热传导模型以及有限元仿真，得到了 TSV 内部典型缺陷的温度云图，能有效地对缺陷进行检测与定位。

1　TSV 内部热量传递理论分析

TSV 三维封装芯片在通电状态下，其内部对应的热平衡被打破，通过建立导热微分方程来详细分析 TSV 三维封装芯片内部的热传导规律[8]。热分析采用 TSV 三维模型中的六面体微元单元，根据傅里叶定律，对微元平面六面体的三个表面上（x，y，z）在 $\mathrm{d}t$ 时间内连续引入的热量分别进行微分，并用下面的表达式来进行微元体的定量描述：

$$\begin{cases} \mathrm{d}\Phi_x = -q^* \dfrac{\partial T}{\partial x}\mathrm{d}y\,\mathrm{d}z\,\mathrm{d}t \\ \mathrm{d}\Phi_y = -q^* \dfrac{\partial T}{\partial x}\mathrm{d}x\,\mathrm{d}z\,\mathrm{d}t \\ \mathrm{d}\Phi_z = -q^* \dfrac{\partial T}{\partial z}\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y\,\mathrm{d}t \end{cases} \tag{1}$$

式中，q^* 表示物体的热流密度，表示该物体在单位时间内的热流量，单位是 $\mathrm{W/m^2}$；T 表示物体温度；x，y，z 为坐标轴方向；Φ_x，Φ_y，Φ_z 分别表示该物体在单位时间内经过 x，y，z 方向截面的热流量，单位为 W；$\dfrac{\partial T}{\partial x}$表示在 x 方向上物体的温度梯度；负号则表示物体的热流量在流向温度降低的方向。

同样地，从微元六面体的三个表面（$x=x+\mathrm{d}x$，$y=y+\mathrm{d}y$，$z=z+\mathrm{d}z$）导出的热能同样可以微分，具体的函数关系表示如下：

$$\begin{cases} \mathrm{d}\Phi_{x+\mathrm{d}x} = \mathrm{d}\Phi_x + \dfrac{\partial \mathrm{d}\Phi_x}{\partial x}\mathrm{d}x = \\ \mathrm{d}\Phi_x + \dfrac{\partial}{\partial x}\left(-q^* \dfrac{\partial T}{\partial x}\mathrm{d}y\,\mathrm{d}z\,\mathrm{d}T\right)\mathrm{d}x & (2a) \\ \mathrm{d}\Phi_{y+\mathrm{d}y} = \mathrm{d}\Phi_y + \dfrac{\partial \mathrm{d}\Phi_y}{\partial y}\mathrm{d}y = \\ \mathrm{d}\Phi_y + \dfrac{\partial}{\partial y}\left(-q^* \dfrac{\partial T}{\partial y}\mathrm{d}x\,\mathrm{d}z\,\mathrm{d}T\right)\mathrm{d}y & (2b) \\ \mathrm{d}\Phi_{z+\mathrm{d}z} = \mathrm{d}\Phi_z + \dfrac{\partial \mathrm{d}\Phi_z}{\partial z}\mathrm{d}z = \\ \mathrm{d}\Phi_z + \dfrac{\partial}{\partial z}\left(-q^* \dfrac{\partial T}{\partial z}\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y\,\mathrm{d}T\right)\mathrm{d}z & (2c) \end{cases}$$

其中，$\Phi_{x+\mathrm{d}x}$ 表示该物体在单位时间内 $x+\mathrm{d}x$ 经过方向截面的热流量，单位为 W。

按照能量守恒定律，在六面体的任何单位时间内，输入微单元体所产生的热与自身所产生的热之和等于所输出的热与微单元体所产生的热的增量之和，对应的热平衡方程如下：

$$\Phi_x + \Phi_y + \Phi_z + \Phi_s = \Phi_{x+\mathrm{d}x} + \Phi_{y+\mathrm{d}y} + \Phi_{z+\mathrm{d}z} + \Phi_{\mathrm{in}} \tag{3}$$

其中，Φ 为内部热源在单位时间内产生的发热量，单位为 $\mathrm{W/m^3}$，Φ_s 为内部热源在单位时间内产生的热流量，Φ_{in} 表示微六面体单元在 $\mathrm{d}t$ 时间内热力学能产生的增量。Φ_s 和 Φ_{in} 二者的表达式如下：

$$\Phi_s = \Phi \cdot \mathrm{d}x\,\mathrm{d}y\,\mathrm{d}z\,\mathrm{d}t \tag{4}$$

$$\Phi_{\mathrm{in}} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y\,\mathrm{d}z\,\mathrm{d}t \tag{5}$$

其中，ρ 为 TSV 三维封装内部微单元的密度，c_p 为比热容。

多数时候，电子元件在初始时刻处于无源状态，因此，内部产生的热源为 $\varnothing = 0\ \mathrm{W/m^3}$。联合式(1)～(5)，可在 TSV 封装结构内部建立热传导微分方程，具体函数形式如下：

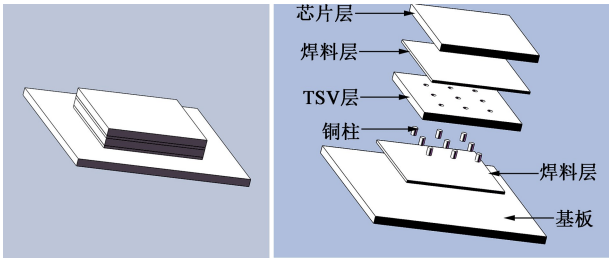
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c_p}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \tag{6}$$

其中，$T = T(x, y, z, t)$ 代表在 t 时刻处于空间坐标为(x, y, z)处的温度值，根据这个公式，可以得到三维芯片中任意一点的温度值。

2 仿真分析设计

2.1 3D-TSV 结构模型

结合 TSV 的实际工艺流程[9]，可将模型简化，为便于热分析和 TSV 互连结构的设计，选择了中间一层的长方体芯片模块，总体结构自上而下分别为：主原料为硅的芯片、连接两层芯片之间的焊球以及填充层(主要原料为树脂材料，以下称为焊料层)、导电铜柱与 Si 填充层(以下称为 TSV 层)、主原料为双马来酰亚胺三氮杂苯树脂的基板[10]，简化后的模型如图 1 所示。

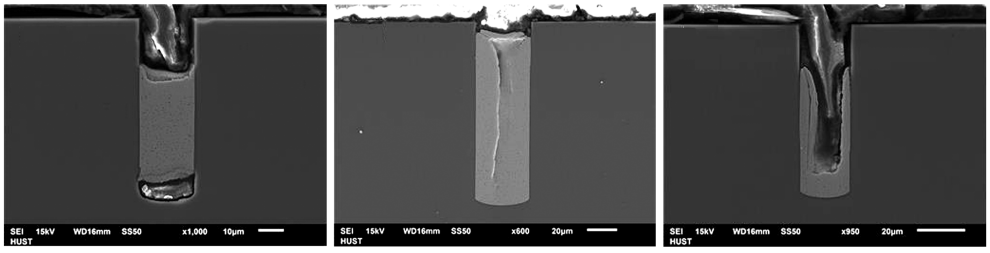


(a) TSV 三维模型 (b) TSV 三维模型各结构

图 1 TSV 三维模型原理示意图

同时，由于 TSV 三维封装具有明显的工艺特性[11]，导致其规模效应更加明显，应力失配更为严重，更容易造成 TSV 内部填充缺失、含有缝隙、底部空洞等典型缺陷[12]，如图 2。

在建立有限元仿真模型时，采用的各部分的物理参数及材料参数见表 1～2。



(a) 填充缺失 (b) 含有缝隙 (c) 底部空洞

图 2 TSV 三维封装内部典型缺陷

表 1 TSV 三维模型各部分尺寸表 单位：μm

模型部分	l	w	h	半径
芯片	40	400	300	—
焊料	400	400	100	—
铜柱	—	—	300	100
TSV 层	400	400	300	—
基板	700	700	300	—

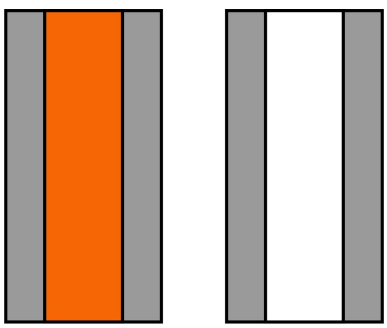
表 2 各结构层材料仿真参数

材料	电阻率/(Ω·m)	导热率/(W·m^{-1}·K^{-1})
芯片	1	124
焊料	0.1	57
铜柱	1.75×10^{-8}	390
TSV 层	0.1	124
基板	0.1	0.3

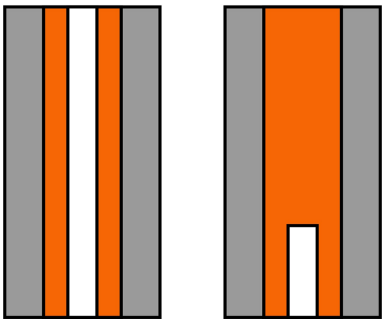
2.2 各类缺陷模型建立

典型缺陷中，填充缺失在有限元模型中表现为内部铜柱完全缺失，含有缝隙为铜柱填充不完全，底部空洞则表现为铜柱底部部分缺失。

为便于研究，在有限元分析时，建立了下列相应的缺陷铜柱模型：(a)完整铜柱，(b)填充缺失(半径 100 μm)，(c)含有缝隙(半径 20 μm，高度 100 μm)，(d)底部空洞(半径 80 μm，高度 100 μm)，如图 3。为便于比较，所有含缺陷的铜柱位于 TSV 三维模型同一处。



(a) 正常 TSV (b) 填充缺失



（c）　含有缝隙　　（d）　底部空洞

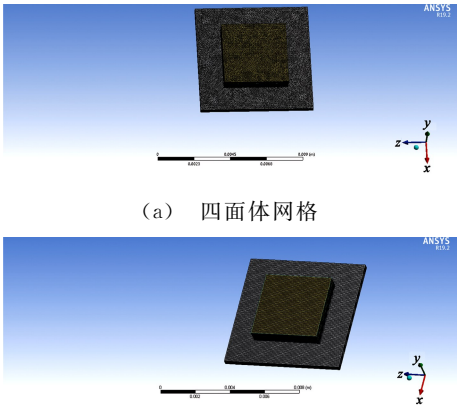
图 3　TSV 三维模型缺陷仿真模型

3　计算分析优化

通电后，TSV 互连结构由于元器件的电阻等参数的影响，会引起热量的变化，受到热-电耦合场的影响[13]。因此通过捕获相应的温度变化的信号，则可以有效地识别 TSV 内部缺陷。在建立 TSV 三维封装各缺陷模型示意图后，选择 thermal-electric 模块进行有限元仿真，除按相应的参数设定材料，对各模型施加相同的载荷，为更好地模拟真实工作时的环境，芯片上表面施加正弦交流电压 $[0.75\sin(\pi t)+0.75]$ V，9 个 TSV 铜柱的底面上施加零电势，环境温度 20 ℃，每部分的表面都与空气进行对流换热，换热系数为 5 W/(m^2 · ℃)。

3.1　单元形状优化

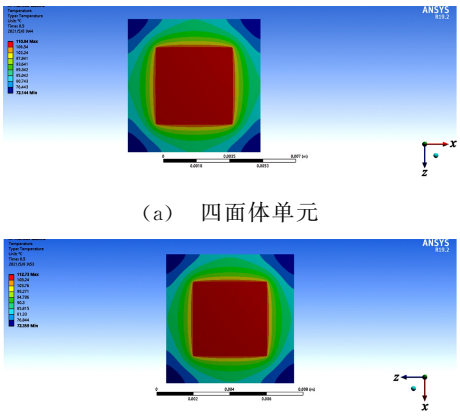
在使用有限元仿真求解过程中，首先需要对整个模型进行网格划分，得到有限元软件能够直接进行操作的基本单元和节点。网格划分形状对计算结果会有一定影响[14-15]，目前常见的网格划分单元为四面体和六面体单元，为了确定网格形状，在不改变模型和单元数量，仅仅改变单元形状的情况下，进行了有限元分析，图 4 分别为四面体、六面体的网格划分结果，得到的仿真结果如图 5 所示。由得到的温度分布云图可知，单元形状不会改变云图形状，但计算数值发生了改变，四面体网格得到的最高温度为 110.28 ℃，六面体网格得到的最高温度为 112.73 ℃。为提高仿真分析计算精度，应该首选六面体单元。



（a）　四面体网格

（b）　六面体网格

图 4　改变单元形状的网格划分结果



（a）　四面体单元

（b）　六面体单元

图 5　改变单元形状获得的仿真结果

3.2　单元规模优化

单元规模极大地影响了计算精度，但是单元数目过多影响了计算效率。为了在保证计算精度的前提下提高计算效率，需要优化单元规模。采用 Multizone(多区域网格划分)进行网格划分，将整个模型全部划分为六面体单元。其中，由于 TSV 层为关键层，为了保证仿真精度，对 TSV 层进行了局部网格细化。除此之外，为了在保证计算精度的同时，提高计算效率，寻求最合适的节点，针对正常 TSV 模型，分别划分为 60 万、70 万、80 万、90 万、100 万、110 万节点单元，获得整体的温度云图和 TSV 关键层的温度云图，图 4(b)为划分为 110 万单元节点的仿真结果。

从仿真结果(如图 5)来看，节点数量的变化虽然没有影响温度分布的趋势(从最高温度和最低温度的位置可知)，但显著影响了最高温度和最低温度的数值。将各节点与所得温度最高值对应起来，由图 6 可见，随着节点数量的增加，划分为 100 万节点时最高温度为 112 ℃，而划分为 110 万节点时最高温度为 112.06 ℃，差距只有 0.06 ℃，温度逐渐趋于稳定，更加贴近真值。为了效果更加明显，得到不同节点对应温度的斜率曲线，同样示于图 6，可以看出，划分为 100 万与划分为 110 万节点对应最高温度值的斜率只有 0.006。因此，110 万节点在保证计

算效率的同时，具有很高的精度，划分网格结果以及局部放大图如图 7 所示。

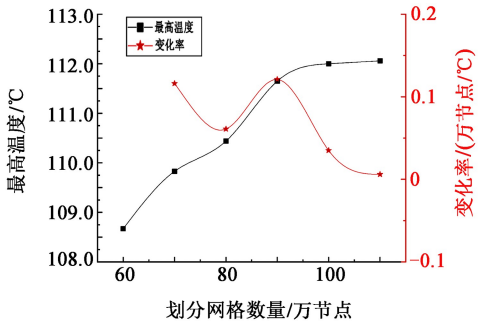
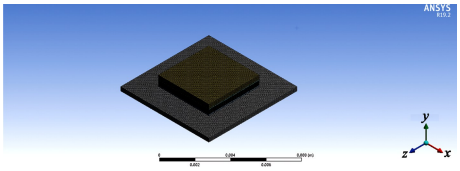
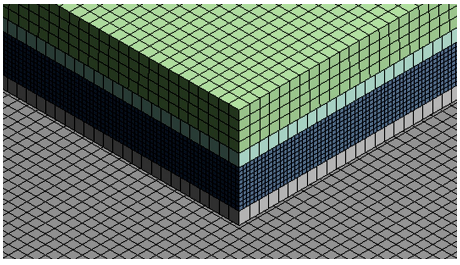


图 6 不同节点对应仿真最高温度与斜率图



(a) 三维模型网格划分图



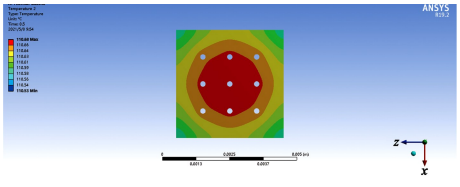
(b) 网格划分局部放大图

图 7 网格划分图

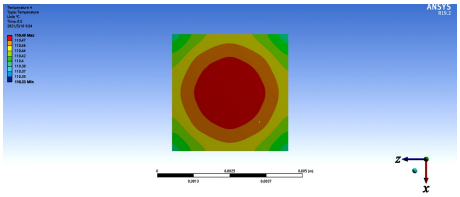
4 结果及讨论

4.1 仿真结果分析

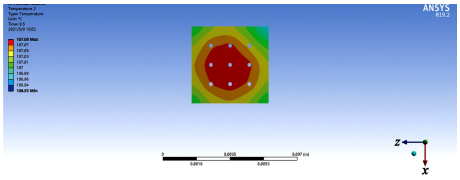
在确定划分网格形状以及网格数量之后，施加相应的载荷和边界条件，得到了含有缺陷铜圆柱的 TSV 三维封装有限元仿真结果，由图 5 可以看出，在



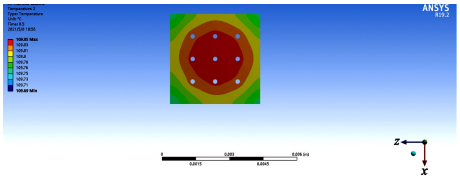
(a) 正常 TSV



(b) 含有缝隙 TSV



(c) 填充缺失 TSV



(d) 底部空洞 TSV

图 8 缺陷 TSV 关键层温度云图

整个互连结构中，芯片为主要的发热源，热量自上而下、自中间向两边扩散，温度逐渐降低。图 8(a)～(d)分别为正常 TSV 与缺陷 TSV 互连结构的关键层温度分布云图。

由图 8 可知，正常 TSV 与缺陷 TSV 温度分布云图有着显著的不同，主要结论有以下几点：

(1)从云图形状看，正常 TSV 温度分布存在对称性、规则性，自关键层内部呈圆环状向外发散，温度逐渐降低，最高温度在关键层中部，最低温度在关键层四个边角处。含有缝隙 TSV 关键层温度分布与正常 TSV 温度分布十分相似；其次为底部空洞 TSV，左下角的 TSV 设置为空洞缺陷，温度云图有整体向右上方偏移的趋势；差异最大的是填充缺失 TSV，右上角设置为填充缺失，温度云图在右上角有明显的向内凹进的趋势。

(2)从仿真结果数值看，正常 TSV 与缺陷 TSV 温度值也存在差异。正常 TSV 关键层温度分布最高温度为 100.68 ℃，最低温度为 100.53 ℃；含有缝隙 TSV 与正常 TSV 温度差异最小，最低温度为 110.34 ℃，最高温度为 110.49 ℃，最高温度与正常 TSV 相差 0.19 ℃；其次是底部空洞 TSV，最高温度与正常 TSV 最高温度相差 0.83 ℃；填充缺失最高温度与正常 TSV 最高温度相差 3.6 ℃。

(3)根据具有差异性的温度云图和数值可以有效地识别缺陷。与此同时，不同缺陷之间的温度分布也有明显的差异性，含有缝隙 TSV 温度分布较为规则，填充缺失 TSV 在缺陷铜柱处发生温度云图的凹陷，底部空洞 TSV 整体温度分布向远离缺陷铜柱的方向偏移。因此获取缺陷内部的温度分布可以对常见的缺陷进行定位。

4.2　讨论

为更深一步了解 TSV 内部故障机理，对仿真结果进行讨论。图 9 为 TSV 三维模型横截面散热示意图，由热传导理论分析可知，芯片的主要散热途径有两条，其中芯片产生的 10%～20%的热量是通过芯片上表面与空气进行对流换热的，剩余 80%～90%的热量在封装器件内部自上而下进行热传导，各层结构热量传到含有缝隙的 TSV 铜柱时会造成传热受阻，热量会在缺陷处沿四壁向周围继续传递，但由于缝隙尺寸较小，热阻较小，因此对铜柱热量传递影响相对较小；底部存在空洞的铜柱，热量传递到缺陷处，会沿着铜柱无空洞处，将一部分热量传递至基底，另一部分热量会聚集在铜柱四周继续传递，传热途径部分因缺陷受到影响；填充缺失 TSV 由于完全缺失铜柱，热量只能沿着内壁四周传递，传热途径完全受阻，因此造成的温度分布与正常 TSV 区别最大。

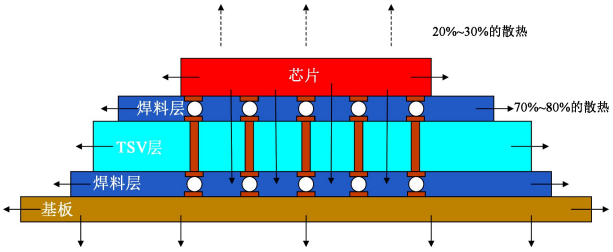


图 9　3D-TSV 三维模型横截面散热示意图

总的来说，内部存在缺陷会打破 TSV 原有的热传导以及热分布，通过得到 TSV 内部的温度分布对内部缺陷的诊断、定位与识别十分有效。

5　总结

本文通过对 TSV 内部热量传递理论分析，以及对正常 TSV 和填充缺失、底部空洞、含有缝隙这三种典型缺陷建立相应的有限元仿真模型，利用热电耦合激励，在保证载荷和边界条件相同的情况下，通过改变节点数量得到了正常 TSV 与缺陷 TSV 的关键层温度分布。通过与无缺陷 TSV 进行比较，可得出结论：含有缝隙 TSV 与正常 TSV 温度分布差异较小；其次为底部空洞 TSV；由于完全缺失铜柱，造成热阻差异较大，填充缺失缺陷表现出明显不同的温度分布。因此，获取 TSV 内部的温度分布可以有效进行 TSV 三维互连结构的缺陷诊断与定位。

参考文献：

[1] Sicard E, Jianfei W, Shen R, et al. Recent advances in electromagnetic compatibility of 3D-ICS-Part Ⅱ[J]. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 2015, 5(1): 65-74.

[2] Maity D K, Roy S K, Giri C. Identification of random/clustered TSV defects in 3D IC during pre-bond testing[J]. J. of Electronic Testing, 2019, 35(5): 741-759.

[3] Wang F, Zhang Q, Zhou K, et al. Effect of cetyl-trimethyl-ammonium-bromide (CTAB) and bis(3-sulfopropyl) disulfide (SPS) on the through-silicon-via (TSV) copper filling[J]. Microelectronic Engineering, 2019, 217(9): 111109. 1-111109. 7.

[4] Lee Y W, Lim H, Kang S. Grouping-based TSV test architecture for resistive open and bridge defects in 3-D-ICs [J]. IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2016, 99:1-1.

[5] 尚玉玲，孙丽媛. TSV 互连结构缺陷故障测试[J]. 桂林电子科技大学学报，2017(5)：382-386.
Shang Yuling, Sun Liyuan. TSV interconnect structure defect failure test[J]. J. of Guilin University of Electronic Technol., 2017(5): 382-386.

[6] 陈鹏飞，宿　磊，独　莉，等. TSV 三维集成的缺陷检测技术[J]. 半导体技术，2016，41(1)：63-69.
Chen Pengfei, Su Lei, Du Li, et al. Defect detection technology of TSV three-dimensional integration [J]. Semi-conductor Technology, 2016, 41(1): 63-69.

[7] Halder S, Miller A, Van Puymbroeck J, et al. Metrology and inspection requirements for successful stacking of integrated circuits[J]. IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing, 2014, 27(3): 370-376.

[8] Huang Y J, Pan C L, Lin S C, et al. Machine-learning approach in detection and classification for defects in TSV-based 3D IC[J]. IEEE Trans. on Components Packaging & Manufacturing Technology, 2018, 8(4): 1-8.

[9] 胡正高，盖　蔚，徐高卫，等. 应用于 MOEMS 集成的 TSV 技术研究[J]. 传感技术学报，2019，32(5)：649-653.
Hu Zhenggao, Gai Wei, Xu Gaowei, et al. Research on TSV technology applied to MOEMS integration[J]. J. of Transducer Technol., 2019, 32(5): 649-653.

[10] 罗心月. 三维集成电路 TSV 阵列热特性研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2019.
Luo Xinyue. Research on thermal characteristics of three-dimensional integrated circuit TSV array[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.

[11] 王文婧，何凯旋，王　鹏. 基于多晶硅填充的 TSV 工艺制作[J]. 传感技术学报，2017，30(1)：59-63.
Wang Wenjing, He Kaixuan, Wang Peng. Production of TSV process based on polysilicon filling [J]. J. of Transducer Technol., 2017, 30(1): 59-63.

（下转第 703 页）

suppression of space stray light of visible cameras with wide field of view[J]. Chinese Optics, 2019, 12(3): 678-685.

[3] Azoubel S, Cohen R, Magdassi S. Wet deposition of carbon nanotube black coatings for stray light reduction in optical systems[J]. Surface and Coatings Technol., 2015, 262(C): 21-25.

[4] Abendroth T, Althues H, Mäder G, et al. Selective absorption of carbon nanotube thin films for solar energy applications[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015(8), 143: 553-556.

[5] Chen Zhonghua, Boström T. Electrophoretically deposited carbon nanotube spectrally selective solar absorbers[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2016, 144(1): 678-683.

[6] Bera R K, Mhaisalkar S G, Mandler D, et al. Formation and performance of highly absorbing solar thermal coating based on carbon nanotubes and boehmite[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 120(7): 287-293.

[7] Zhao Ling, He Xiuli, Li Jianping, et al. Electrosprayed carbon-based black coatings for pyroelectric detectors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 196(7): 16-21.

[8] Yang Zupo, Ci Lijie, Bur J A, et al. Experimental observation of an extremely dark material made by a low-density nanotube array[J]. Nano Lett., 2008, 8(2): 446-451.

[9] Selvakumar N, Krupanidhi S B, Barshilia H C. Carbon nanotube-based tandem absorber with tunable spectral selectivity: Transition from near-perfect blackbody absorber to solar selective absorber[J]. Advanced Materials, 2014, 26(16): 2552-2557.

[10] Wang X J, Flicker J D, Lee B J, et al. Visible and near-infrared radiative properties of vertically aligned multi-walled carbon nanotubes[J]. Nanotechnology, 2009, 20(21): 1-9.

[11] Ishii S, Sugavaneshwar R P, Nagao T, et al. Titanium nitride nanoparticles as plasmonic solar heat transducers[J]. J. of Physical Chemistry C, 2016, 120(4): 2343-2348.

[12] Gao Huixuan, Peng Wei, Cui Wenli, et al. Ultraviolet to near infrared titanium nitride broadband plasmonic absorber[J]. Optical Materials, 2019, 97(11): 1-7.

[13] Liu Zhengqi, Zhong Haozong, Zhang Houjiao, et al. Silicon multi-resonant metasurface for full-spectrum perfect solar energy absorption[J]. Solar Energy, 2020, 199(5): 360-365.

[14] Fan Peixun, Bai Benfeng, Zhong Minlin, et al. General strategy toward dual-scale-controlled metallic micro—Nano hybrid structures with ultralow reflectance[J]. ACS Nano, 2017, 11(7): 7401-7408.

[15] Wattoo A G, Bagheri R, Ding Xuefeng, et al. Template free growth of robustly stable nanophotonic structures: broadband light superabsorbers[J]. J. of Materials Chemistry C, 2018, 32(6): 8646-8662.

作者简介：

何志聪(1996—)，男，广东人，硕士研究生，主要从事光吸收涂层的研究；

朱丽慧(1971—)，女，浙江人，博士，教授，博士生导师，主要从事材料方面的研究。

(上接第 697 页)

[12] 姜传恺. TSV 三维封装内部典型缺陷的特征识别方法研究[D]. 武汉：湖北工业大学，2019.
Jiang Chuankai. Research on the feature recognition method of typical defects in TSV 3D package[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019.

[13] 薛栋民. 应用于 TSV 互连的电镀填充工艺研究[D]. 武汉：华中科技大学，2014.
Xue Dongmin. Research on electroplating and filling process applied to TSV interconnection[D]. Wuhan: Huazhong Unversity of Science and Technology, 2014.

[14] He Shuaijia, Gao Hongjun, Wang Lingfeng, et al. Distribution-ally robust planning for integrated energy systems incorporating electric-thermal demand response[J]. Energy, 2020, 213: 118783.

[15] Zhu J, Bykov V, Pagani I, et al. Specific features of eddy current analysis with ANSYS® for fast plasma current decay event in W7-X[J]. Fusion Engineering and Design, 2021, 163: 112136.

作者简介：

聂　磊(1978—)，男，博士，教授，从事电子制造工艺可靠性研究。

(上接第 691 页)

[16] 李晓龙，张世宏，刘先国. 色散平坦高非线性超低损耗双折射 PCF 有限元仿真[J]. 光通信技术，2020, 44(1): 58-62.
Li Xiaolong, Zhang Shihong, Liu Xianguo. Finite element simulation of high nonlinear ultra-low loss birefringent PCF with flat dispersion[J]. Optical Communication Technol., 2020, 44(1): 58-62.

[17] Li Jianhua, Wang Jingyuan, Teng Yichao, et al. Broadband supercontinuum generation based on filled structural photonic crystal fibers with low incident optical power[J]. Optical and Quantum Electronics, 2020, 52(10): 1950-1956.

[18] White T P, Kuhlmey B T, MePhedran R C, et al. Multipole method for microstructured optical fibers. Ⅰ. Formation[J]. J. of the Optical Society of America B, 2002, 19(10): 2322-2330.

作者简介：

杜海龙(1983—)，男，硕士，副教授，从事光纤通信信号与信息处理研究。