

焊层空洞对 IGBT 模块热应力的影响

吴煜东^{1,2}, 常桂钦^{1,2}, 彭勇殿^{1,2}, 方杰^{1,2}, 唐龙谷^{1,2}, 李继鲁^{1,2}

(1. 电力电子器件湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412001; 2. 株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 焊层空洞是造成 IGBT 模块散热不良和疲劳失效的主要原因之一。考虑芯片场环区的影响, 建立了 IGBT 模块封装结构的三维有限元模型; 研究了不同焊层厚度、焊层空洞率和空洞位置对模块最高结温与最大等效应力的影响; 探讨了焊层空洞对模块瞬态热阻抗的影响。

关键词: IGBT 模块; 焊层厚度; 空洞率; 热分析; 应力分析; 瞬态热阻抗

中图分类号: TN32

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2014)01-0017-07

Effect of Solder Voids on IGBT Thermal and Stress Performance

WU Yu-dong^{1,2}, CHANG Gui-qin^{1,2}, PENG Yong-dian^{1,2}, FANG Jie^{1,2}, TANG Long-gu^{1,2}, LI Ji-lu^{1,2}

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Power Electronics Devices, Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Solder void is one of the important reasons for the heat diffusion badness and fatigue failure of IGBT module. A 3-D finite model was established for IGBT package configuration with considering the influence of die's field ring area. It studied the effect of solder thickness, void percentage and void position on maximum temperature and equivalent stress, and analyzed the effect of void percentage on transient thermal impedance.

Keywords: IGBT module; solder layer thickness; void ratio; thermal analysis; stress analysis; transient thermal impedance

0 引言

IGBT 模块封装采用的真空焊接技术是将 IGBT 芯片、FRD 芯片与衬板、衬板与基板堆叠在一起。焊接过程中形成的气泡或焊料层的涂抹不均匀等会在焊层中产生形状大小不同的空洞。焊层不仅是 IGBT 模块散热的主要通道, 而且在温度循环过程中还要承受因材料间热膨胀系数不匹配而产生的周期性应力, 减缓芯片受机械应力的损伤。另外焊层中的空洞还会引发电流密集效应, 导致热电击穿。随着 IGBT 模块的电压等级提升和功率密度增大, 芯片的功耗也越来越大, 故对焊层的传热与机械性能提出了更高的要求。在高频开关过

程中, 焊层蠕变会产生更多的空洞, 使热量不能有效散发, 最终导致模块失效, 因此研究焊层空洞对模块热应力的影响对改善模块可靠性有重要意义。

现有相关文献大多仅分析了常规焊接型 IGBT 的封装结构的热性能, 针对焊层空洞对热应力影响的研究较少^[1-4]。工艺过程中空洞检测只能定量判断其所占焊层的面积, 而不能得到其对模块性能的影响, 某些标准也不再适用于指导 IGBT 模块的焊层空洞检测^[5]。大功率高压 IGBT 器件的芯片结温和模块各层材料应力值测量的不稳定性、复杂性等因素给模块的热与机械性能研究带来了较多困难, 有限元仿真能够较好地避免以上问题。基于此背景, 本文运用有限元软件建立了 IGBT 模块的三维封装模型, 定量分析了焊层空洞大小及位置对模块热应力的影响, 其仿真结果对封装工艺改进和确定设计准则具有指导意义。

收稿日期: 2013-11-10

作者简介: 吴煜东 (1969-), 男, 高级工程师, 长期从事新型电力半导体器件的设计、制造、测试和管理工作。

1 有限元分析模型

为减少计算量,选取IGBT模块的1/4进行建模。实体模型为七层结构(图1),分别为芯片、芯片焊层、正面铜层、衬板、背面铜层、衬板焊层、基板。热计算选用8节点的Solid 70单元,应力计算采用间接法。有限元网格模型如图2所示,各种材料的几何尺寸及材料物理特性参数见表1。实体模型和边界条件进行了以下假设^[6-7]:

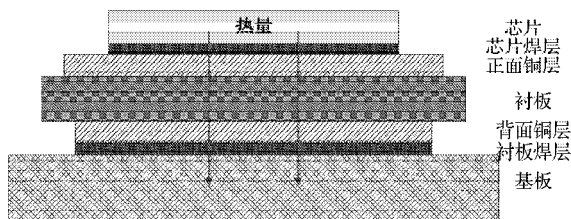


图1 IGBT模块结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of IGBT module structure

(1)正面铜层简化为规则图形;(2)芯片的散热主要考虑沿芯片和基板的导热,忽略模块上部对流换热及辐射换热的影响;(3)忽略母排的发热量;(4)材料接触良好,忽略各层材料间的接触热阻。

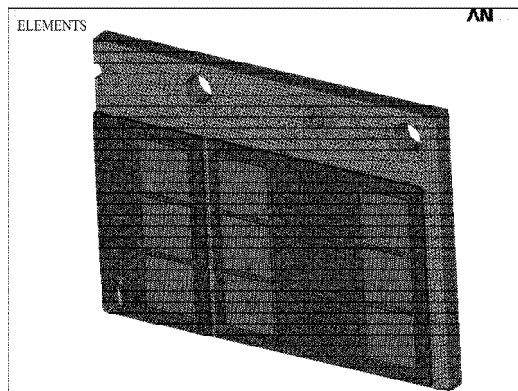


图2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

表1 IGBT实体模型材料参数

Tab. 1 Material property of IGBT module

名称	长/mm	宽/mm	厚/mm	热导率/ [W/(m·℃)]	密度/ (kg·m ⁻³)	比热容/ [J/(kg·℃)]	弹性模量/GPa	热膨胀系数/K ⁻¹	泊松比
IGBT/FRD	13	13	0.35	见式(1)	2 320	713	112	2.49 × 10 ⁻⁶	0.28
芯片焊层	13	13	0.15	64	7 430	220	16.6	12 × 10 ⁻⁶	0.4
正面铜层	50	40	0.3	398	8 930	385	110	16.4 × 10 ⁻⁶	0.34
衬板	58.2	49.5	1	150	3 300	750	186	4.4 × 10 ⁻⁶	0.31
背面铜层	57	48.3	0.25	398	8 930	385	110	16.4 × 10 ⁻⁶	0.34
衬板焊层	57	48.3	0.15	64	7 430	220	16.6	12 × 10 ⁻⁶	0.4
基板	93.5	68.5	5	200	2 960	760	230	7.5 × 10 ⁻⁶	0.154

本文中Si材料导热系数 λ_{Si} 随绝对温度 T 的变化规律^[8]为:

$$\lambda_{\text{Si}}(T) = \frac{A}{T-B} \quad \text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K}) \quad (1)$$

式中 A 、 B 为常数, $A=320$, $B=80$ 。相对半导体材料,金属的导热系数变化较小,因此计算时只考虑Si材料随温度的变化。

IGBT模块开关的频率较高,故采用工作波形的积分平均值作为施加载荷。模型中芯片是唯一的发热源,施加边界条件分别为:每个IGBT芯片功耗约为130 W,FRD芯片的功耗为60 W,采用芯片体积生热率为加载条件,经计算得出,IGBT芯片和FRD芯片的体积生热率分别为 $3.71 \times 10^9 \text{ W/m}^3$ 和 $1.71 \times 10^9 \text{ W/m}^3$;基板通过导热硅脂与散热器接触,将其散热作用等效为对流换热,对流换热系数取 $4\,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{℃})$ 。基板的4个侧面与空气自然对流换热,对流换热系数为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{℃})$,环境温度为 25℃ 。

2 计算结果与分析

2.1 场环区对模块温度的影响

在许多相关资料中均没有考虑到芯片存在不发热

区域。IGBT芯片和FRD芯片的结构均包括两部分:中间的元胞区和四周的场环区,场环区在芯片正常工作时没有电流,所以场环区不会发热。本文的计算中比较了芯片全部区域发热和芯片仅元胞区发热两种情况下的温度分布(图3)。从图3中可知,在相同的功率载荷下,仅考虑芯片元胞区发热时的最高结温较芯片全部区域发热时的结温高出近 10℃ 。通常器件的工作温度上升 10℃ ,其失效率相应会增加1倍^[9],为了使计算结果更接近实际,仿真计算中应考虑芯片场环区不发热。下文中的所有计算模型均考虑了芯片场环区无热量生成。

从图3(a)可知,IGBT模块内部温度分布不均匀,结温差别较大。最高结温处在模块中部的IGBT芯片上,且稍微偏离芯片中心位置。这是由于相邻芯片间具有热耦合作用,上下芯片阻碍了中间IGBT芯片热量的横向传导;另一方面,FRD芯片功耗较小,两者的热耦合作用比其它IGBT芯片小。焊层、衬板和基板的最高温度均出现在芯片最高温度的正下方,表明芯片产生的热量主要是向下传导。