

IGBT 模块热特性测量与内部结构热特性分析

李 忻, 周望君, 奉 琴, 王贤元
(株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: IGBT 模块内部各层结构的热学特性容易受到外界条件(如封装工艺或封装原材料性能的变化等)的影响。文章利用结构函数的特性, 经过对 IGBT 实际测量和计算, 获得模块内部的结壳热阻, 并根据不同材料的热阻和热容值对 IGBT 模块内部每层结构进行热特性分析。

关键词: IGBT; 热特性; 瞬态双界面测试法; 结构函数

中图分类号: TN386.2

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2016)02-0026-04

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2016.02.006

Measurement of Thermal Characteristics for IGBT Module and Thermal Characteristics Analysis of Its Inside Structure

LIXin, ZHOU Wangjun, FENG Qin, WANG Xianyuan
(Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Thermal characteristics of IGBT module structure are easily influenced by outside conditions, such as changes of packing technology or raw material performance. In this paper, structure function was used to obtain the junction thermal resistance inside module via practical calculation and test. Then thermal characteristics analysis was made for each layer inside IGBT module, in accordance with thermal resistance and thermal capacitance of different materials.

Keywords: IGBT; thermal characteristic; transient dual-interface test method; structure function

0 引言

焊接型大功率 IGBT 模块的内部由多个 IGBT 芯片经芯片焊接、引线键合、基板和母排焊接等并联组成。在 IGBT 模块封装过程中, 原材料材质的更换和工艺的改进都会对模块的结壳热阻值及其内部热结构造成影响, 即不同的焊接材料、焊接温度对模块的焊接均匀性、焊接空洞率和基板的形变是不一样的, 它也将影响 IGBT 的电学特性和热学特性; 此外, 在 IGBT 的应用中, 增加 IGBT 的发热量, 也将加速 IGBT 的失效^[1-3]。由于 IGBT 模块结构的特殊性, 用普通的方法很难十分准确地分析出 IGBT 模块内部每层结构对其热特性的影

响, 若利用结构函数对 IGBT 模块内部热结构进行分析探究, 则可以精确计算 IGBT 模块内部每层结构对其热阻的贡献。本文采用结构函数法分析了从发热源(芯片)到模块环境的热流路径上的所有热容与热阻分布情况, 并根据结构函数上的斜率(热容与热阻的比值)变化, 区分出代表不同材料的线段, 从而计算出热流路径上不同材料的热阻与热容。

1 IGBT 热特性测量

1.1 IGBT 模块的结构

IGBT 模块是以 IGBT 芯片及其配套 FRD 芯片为核心, 在其上下两面辅之以多种材料, 堆叠成一个具有高可靠性、体积小、易于与外部电路接口的复杂特殊结构(图 1)。为了便于应用时的安装, IGBT 的所有引出端子都集中到一面, 电流从该面流入和流出,

收稿日期: 2015-04-22

作者简介: 李忻(1988-), 女, 硕士研究生, 现从事大功率 IGBT 模块应用技术研究工作。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51490682)

而另一面负责散热^[4]。这样独特的结构形成了 IGBT 的单面热流路径,也就是说,IGBT 模块是单面散热形式(图 2)。

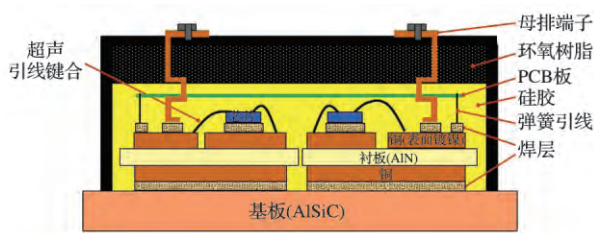


图 1 IGBT 模块构造剖面图
Fig. 1 Construction profile of IGBT module

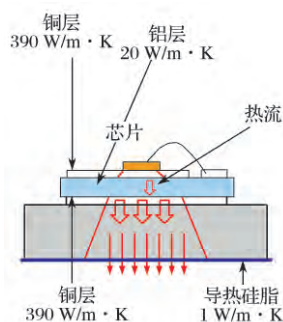


图 2 IGBT 的热流路径
Fig. 2 Heat flux path of IGBT

1.2 K 系数校准测试

半导体器件中,PN 结的电流-电压特性方程为

$$I = I_0 \exp(qV_j / (kT)) \quad (1)$$

则有:

$$dV_j / dT = k/q \times \ln(I/I_0) = 1/K = \text{const} \quad (2)$$

式中: I ——通过 PN 结的电流; I_0 ——反向饱和电流; q ——电子电荷量 ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$); V_j ——PN 结两端外加电压; k ——玻尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$); T ——热力学温度 (即绝对温度, 300 K); K ——温度与热敏参数的关系值, 即 K 系数。

在小电流情况下, 结温和电压呈线性关系, 且在很大温度范围内是精确成立的, 因此可以用 P-N 结固定电流下的正向电压值来指示温度变化。这种线性关系的获取即称为 K 系数校准^[5-7]。

同理, 在 IGBT 模块中集电极和发射极之间的电压 V_{ce} 与其结温 T_j 之间也同样符合上述线性关系。所以, 在进行 IGBT 模块热特性测试之前, 我们需要对 IGBT 模块进行辅助测试, 即 IGBT 的 K 系数校准测试, 其原理如图 3 所示。

在不同的温度条件下, 对某一个 IGBT 模块的通态电压进行精确测试。测试时, 将器件涂上导热硅脂、通过力矩扳手固定于加热板上, 温度的上下限分别设定为 130 °C 和 25 °C, 以 15 °C 为步长, 在温度和压降达到稳

定状态时获取采样值并拟合线性关系 (图 4)。

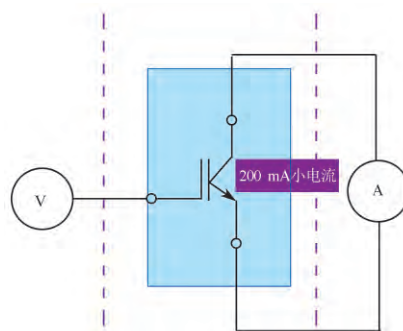


图 3 IGBT K 系数校准原理
Fig. 3 Theory of IGBT coefficient K calibration

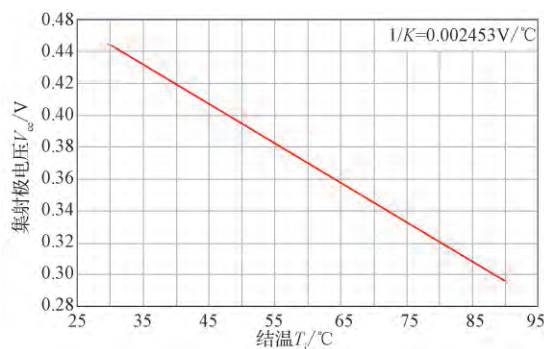


图 4 IGBT 的 K 系数曲线
Fig. 4 Curve of IGBT coefficient K

完成 K 系数校准后, 可通过测量 IGBT 的 V_{ce} 数值的变化来得到其结温的变化:

$$\Delta T_j = K \times \Delta V_{ce}$$

式中: ΔT_j ——通以持续加热功率后 IGBT 结温的变化; ΔV_{ce} ——IGBT 集电极和发射极之间的通态电压的变化。

2 IGBT 瞬态热阻抗结构函数

2.1 瞬态热阻抗的测试方法

为了获取器件在升降温过程中各个时刻下器件的热阻值, 将器件固定在散热器上并通以持续的加热功率, 通过记录时间与热阻值关系, 获得瞬态热阻抗曲线。

通常, 半导体器件的热阻抗被定义^[4-6]为

$$Z_{thJC}(t) = \frac{T_j(t) - T_j(t=0)}{P_H} \quad (3)$$

式中: $Z_{thJC}(t)$ ——某时刻的瞬态热阻抗; $T_j(t)$ ——某时刻的结温; $T_j(t=0)$ —— $t=0$ 时结温; P_H —— $t=0$ 时施加的加热功率。

通过瞬态双界面测试法可以获取不同时刻下的瞬态热阻抗曲线, 如图 5 所示。根据瞬态双界面测试法定义^[8], 获取结壳热阻必须采用两种不同的冷却条件进行两次测量, 从而分别获得不同冷却条件下的两条瞬态热阻抗曲线, 通过判定两条曲线的分离点即可获取器件

结壳热阻。图6为结壳热阻提取方法。

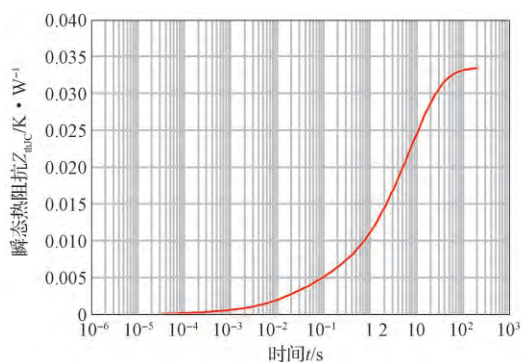


图5 瞬态热阻抗曲线图

Fig. 5 Transient thermal impedance curve chart

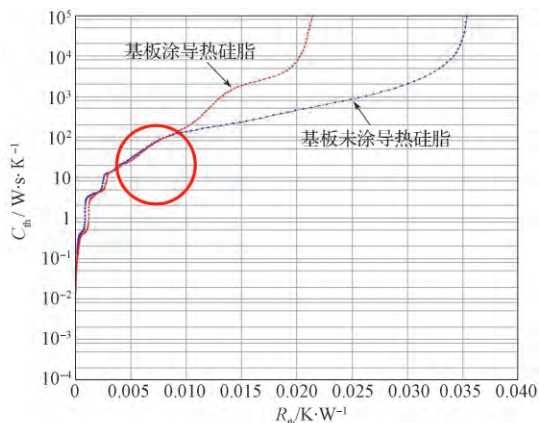


图6 结壳热阻提取方法

Fig. 6 Obtained method of junction thermal resistance

对于不同的测试条件，两条热阻抗曲线的差异可定义为

$$\Delta Z_{thJC} = Z_{thJC1} - Z_{thJC2} \quad (4)$$

将时间参数对数化处理，即令 $Z = \ln(t)$ ，则热阻抗单位阶跃响应 $a(Z)$ 为

$$a(Z) = Z_{thJC}(t = \exp(Z)) \quad (5)$$

对于整个系统，在 Z 域上的阶跃响应为

$$\frac{da}{dZ} = R(Z) \otimes w(Z) \quad (6)$$

其中， $w(Z) = \exp(Z - \exp(Z))$ 。

通过上述计算可得到连续时间频谱函数 $R(Z)$ ，再将其离散化得到 Foster 网络结构，最后将 Foster R-C 网络转化为 Cauer R-C 网络，通过专门的软件可计算出最终的结构函数曲线。

2.2 结构函数曲线

由于 IGBT 模块的散热路径为芯片到基板的单一散热路径，因此，以热阻为横轴，热容为纵轴，便可以得到模块内部热流通路每一点上的热阻、热容对应关系，即为结构函数曲线。结构函数曲线是依据模块瞬态热阻抗曲线通过反卷积变换得到，其计算原理可依据 JEDEC51-14 标准^[9]，本文不做具体介绍。通过对本文

中被测模块进行瞬态热阻抗测量后，提取该模块的结构函数曲线（图7）。

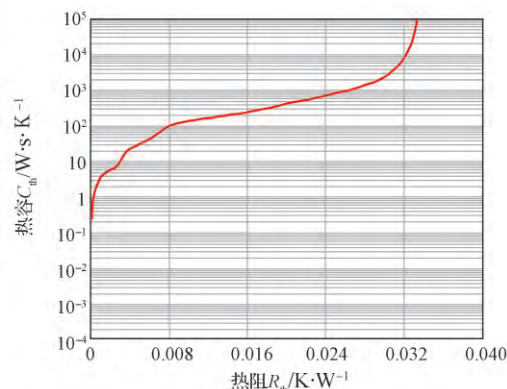
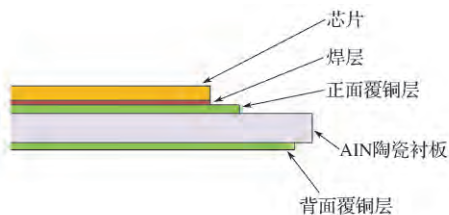


图7 IGBT 模块结构函数曲线

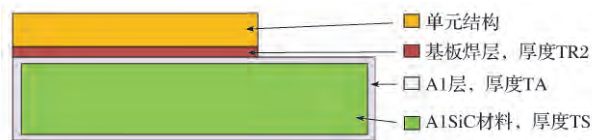
Fig. 7 Structure function curve of IGBT module

2.3 结构函数曲线分层信息提取

模块可分为芯片、衬板焊层、衬板、基板焊层、基板5层，由于基板焊层同时为衬板所用，又可分为正面铜层、绝缘层、背部铜层。模块剖面图见图8。



(a) 衬板单元剖面图



(b) 模块纵向剖面图

图8 衬板单元及模块纵向剖面图

Fig. 8 Substrate unit and module longitudinal profile

通过结构函数分析可以确认 IGBT 模块内部结构材料的分层位置，同时反映各层的热阻、热容信息。

对于一种材质，如果形状规则，其热阻 R_{th} 可表示为

$$R_{th} = \frac{d}{\lambda_{th} \times A} \quad (7)$$

式中： λ_{th} ——材料的热导率； d ——材料厚度； A ——材料横截面积。

材料热容 C_{th} 可表示为

$$C_{th} = c_{th} \times m \quad (8)$$

式中： c_{th} ——材料热容率； m ——器件质量。

在模块内部，对于同一种材质，若横截面积不发生变化，在热流通路上的热容热阻比可表示为

$$\frac{\Delta C_{th}}{\Delta R_{th}} = \frac{c_{th} \times m}{d} = \frac{c_{th} \times \rho \times A \times d}{d} = c_{th} \times \rho \times \lambda_{th} \times A^2 = \text{const} \quad (9)$$

式中： ρ ——材料的密度。

从式（9）可以看出，结构函数曲线上斜率接近的曲线段近似为同种材质；若曲线出现拐点，则表明两曲线段为不同材质，且拐点位置即为不同材质的交接点。

对选定的模块进行材料分层状态的分析：首先确定其分层拐点，接着确定各层材料所对应的热阻、热容值，最终通过试验数据模拟 RC 模型。在热流通路上，材质若发生变化，则热阻与热容比也会相应变化，从而形成曲线拐点，因此可通过曲线拐点位置判别分层信息（图 9）。

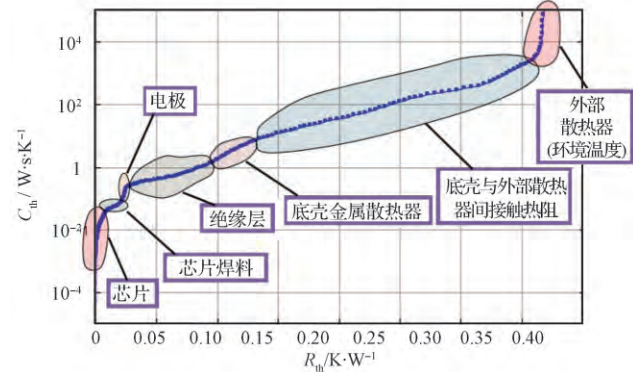


图 9 IGBT 各层材料的热阻和热容分布结构函数曲线
Fig. 9 Function curves of thermal resistance and thermal capacity structure for material of IGBT each layers

从 IGBT 模块封装内部的散热结构可知，底壳（即基板）与外部散热器间接热阻将近占整个 IGBT 模块封装热阻的 50%，因此改善此处焊接层质量对优化 IGBT 模块热特性将非常重要。

对结构函数作进一步分析，我们在结构函数曲线上将表示 IGBT 模块散热路径上最为稳定的金属外壳（基板部分）部分放置在一起分析可知：

（1）IGBT 模块间结构函数的差异（也就是结到环境的热阻 R_{thja} 的差异）由两部分组成，它包括 IGBT 模块封装内部热阻的差异以及 IGBT 模块与散热器之间的导热硅脂的热阻和接触热阻之间的差异；

（2）IGBT 模块外壳到散热器间导热材料的热阻（包括接触热阻）与 IGBT 模块安装在散热器的导热材料品性及工艺水平等因素有关，如：导热材料的品牌、涂覆厚度及均匀性，安装螺丝的紧固力矩是否一致、紧固顺序是否相同，散热器安装面的光洁度等；

（3）安装工艺稳定，则 IGBT 模块内部的热阻差异非常小（一般约为 0.002 6 K/W），模块到散热器之间的热阻差异也可满足应用要求。

3 数据分析

选取同一型号 4 个 IGBT 模块用上述方法对其进行热阻抗测试，并用结构函数曲线反映出模块从芯片到散热器的热流通路上累计的热阻、热容信息（见表 1）。

表 1 不同材质 IGBT 模块的分层信息

Tab.1 Delamination information for IGBT modules with different material

参数		模块 1	模块 2	模块 3	模块 4
芯片层	热阻 /K·W ⁻¹	2.48E-4	2.56E-4	2.06E-4	2.3E-4
	热容 /W·s·K ⁻¹	0.089 3	0.950 1	0.054 8	0.088 2
衬板正面铜层	热阻 /K·W ⁻¹	2.54E-4	2.36E-4	2.93E-4	2.1E-4
	热容 /W·s·K ⁻¹	0.127 0	1.686	0.102	0.126 6
衬板绝缘层	热阻 /K·W ⁻¹	0.0011	0.001 3	9.26E-4	9.38E-4
	热容 /W·s·K ⁻¹	0.188 7	1.852	0.103 8	0.141 8
衬板背面铜层	热阻 /K·W ⁻¹	2.43E-4	3.78E-4	2.56E-4	2.79E-4
	热容 /W·s·K ⁻¹	2.229 3	6.59	2.043	2.458
衬板层	热阻 /K·W ⁻¹	0.001 597	0.001 914	0.001 475	0.001 427
	热容 /W·s·K ⁻¹	2.545	10.128	2.248 8	2.726 4
基板焊层	热阻 /K·W ⁻¹	0.001 1	7.87E-4	0.001 3	0.001 3
	热容 /W·s·K ⁻¹	2.958 0	3.861	1.916	2.933
基板层	热阻 /K·W ⁻¹	0.006 7	0.005 7	0.005 2	0.006 3
	热容 /W·s·K ⁻¹	113	107.6	74.13	104.1

通过数据分析可得，所测试 IGBT 模块的热特性为：

（1）芯片的热阻在整个结壳热阻中的比重约为 5%；

（2）在使用不同的焊料进行真空焊接时 IGBT 热特性有较大差异，但焊料热阻在结壳热阻中的比重均约为 2%；

（3）工艺改进对衬板热阻有较大影响，衬板热阻在结壳热阻中的比重约为 23%；

（4）基板的形状和拱度对模块热阻影响明显，改善基板制造工艺可减小模块热阻。

因此，可通过改善衬板、基板焊层及基板材质和焊接工艺减小模块结壳热阻。

4 结语

本文介绍了 IGBT 模块内部的物理结构及其与结构函数曲线位置相对应的关系，提出模块热阻与热容信息的确认方法，并通过对模块在不同冷却工况下结构函数曲线的分离点分析，获得了 IGBT 模块内部各个物理层的热阻分布，对 IGBT 模块各个物理层的热占比进行了分析。研究发现衬板热阻在结壳热阻中的比重约为 23% 以上，同时发现，封装材料的性能对 IGBT 模块的热特性影响较大。由此我们可获得减少 IGBT 模块热阻的有效途径，即在 IGBT 模块制造过程中通过改善衬板、基板焊层及基板材质和焊接工艺进一步减小模块结壳热阻。

参考文献：

[1] STEFAN Linder. 功率半导体 - 器件与应用 [M]. 肖曦, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008.
[2] 正田英介. 电力电子学 [M]. 耿连发, 耿晓兰, 译. 北京: 科学出版社, 2001.
[3] 奉琴, 李世平, 陈彦, 等. 基于结构函数的大功率 IGBT 热阻测量方法 [J]. 大功率变流技术, 2015 (3): 39-41.

《大功率变流技术》第二届优秀论文评选结果

为了进一步提高两刊论文的学术水平和质量,持续吸收和催生优秀稿件,《大功率变流技术》编辑部于2015年12月启动了第二届期刊优秀论文评选活动。为鼓励和培育优秀青年作者,本届评选活动特增设优秀论文新秀奖。经多方推荐和专家评审,采用定性和定量相结合的评价方式,本着公平公正的原则,从本刊2011~2014年发表的论文中评选出8篇优秀论文,具体如下:

论文题目	作者	单位	奖项
谐波治理技术现状及其发展	罗 安, 吴传平, 彭双剑	湖南大学	优秀奖
基于转矩分配的电动汽车横摆稳定性控制	丁惜瀛, 张钦爽, 覃艳丽, 苑克臣	沈阳工业大学	优秀奖
用并网逆变器实现有源滤波与无功补偿功能的研究	刘 聪, 戴 珂, 张树全, 段科威, 康 勇	华中科技大学	优秀奖
三相三电平 PWM 整流新技术	伍文俊, 钟彦儒	西安理工大学	优秀奖
永磁同步牵引电动机温度场仿真分析	杨金霞, 元约平, 王 健, 何思源	株洲南车时代电气股份有限公司	优秀奖
光伏并网逆变器低电压穿越技术研究	王 南, 陈艺峰, 吴恒亮	南车电气技术与材料工程研究院	优秀奖
改进扰动观察法的最大功率点跟踪	刘 飞, 鲁宝春, 李昌超, 李兴进, 苏刘军	辽宁工业大学	新秀奖
基于时间序列分析和神经网络的风电功率预测方法研究	马 蕊, 胡书举, 许洪华	中国科学院电工研究所	新秀奖

请所有获奖论文的第一作者于2016年6月30日之前与编辑部联系领奖事宜。逾期不与编辑部联系,视为主动放弃该荣誉及奖金。

《大功率变流技术》编辑部

Tel: 0731-28498232

E-mail: ct&et@csrzic.com

(上接第29页)

[4] WILLIAM W S, RONALD P C. Power Electronic Modules Design and Manufacture [M]. Boca Raton: CRC Press, 2005.

[5] Mentor Graphics. T3Ster-Master: 瞬态热学评估工具 [Z]. 上海: Mentor Graphics, 2012.

[6] Mentor Graphics. T3Ster-Master: 瞬态热学测试 测量控制手册 [Z]. 上海: Mentor Graphics, 2012.

[7] Mentor Graphics. T3Ster-Master: 瞬态热测试仪 硬件参考指南

[Z]. 上海: Mentor Graphics, 2012

[8] PERLAKY G, FARKAS G. Thermal Transient Characterisation of Com-plex Circuits [C] //Proceedings of the 14th International Workshop on Thermal Investigation of ICs and System. Rome (Italy), 2008: 106-111.

[9] JEDEC JESD51-14, Transient dual interface test method for the measurement of the thermal resistance junction to case of semiconductor devices with heat flow through a single path [S]. 2010.