

DOI: 10.7652/xjtuxb201404021

高温功率循环下绝缘栅双极型晶体管 失效特征及机理分析

陈明

(海军驻广州四二七厂军事代表室, 510715, 广州)

摘要: 结合绝缘栅双极型晶体管(IGBT)模块结构和工作的不同阶段,分析了 IGBT 失效类型及其失效机理。深入分析了影响 IGBT 工作寿命的 3 种封装失效类型及失效机理。高结温、大温度梯度极端工作方式下主要的封装失效类型是键合引线失效,由某一根或几根过载引起电流分配不均引发,失效前压降大,热阻基本不变。通过分析得到 IGBT 模块的寿命值近似服从 Weibull 分布。实验过程中结合各类显微镜和红外热像仪得出的失效特征分布规律表明:经过功率循环后的芯片表面中心区域、边缘绝缘保护环原胞结构均由规则点阵变化为点阵中出现小的黑圈、空穴、裂纹,变得不再规则;各物理层接触面间的缺陷由芯片向下呈递减趋势;IGBT 模块各物理层不平整度由基板向上呈递减趋势。通过实际实验发现,可将压降的突变位置作为 IGBT 可靠性评估的标准。

关键词: 绝缘栅双极型晶体管;功率循环;失效;键合引线;焊料层

中图分类号: TN32 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)04-0119-08

Failure Characteristics and Mechanism Analysis of IGBT Modules under High-Temperature Power Cycling

CHEN Ming

(Naval Military Representative Office in Guangzhou No. 427 Company, Guangzhou 510715, China)

Abstract: Failure types and mechanism of IGBT modules according to the module structure and different operation stages are analyzed, and three types of package failure mechanism affecting the lifetime of IGBT are discussed. The package failure types and modes are concerned with the lift-off and meltdown of bonded-wires, solder fatigue, and reconstruction of metallization. The failures of bonded-wires are generally caused by a great change in junction temperature and high temperature gradient. The detection and inspection of the failure process of bonded-wires, the structure of chip surface, and the delamination and cracks and voids in solder layers by means of the instruments demonstrate that the main failure mode of high junction temperature and temperature gradient is the lift-off and meltdown of bonded-wires. The overload of one or more bonded-wires leads to an unbalanced distribution of the current. When V_{CE} gradually becomes big, then a sharp jump happens before failure, the junction-case thermal resistance remains steady, and the value of IGBT lifetime is approximate to that of Weibull distribution. By investigating various microscopes and infrared thermal imaging, the failure characteristics are obtained. Failure characteristic distribution show that after power cycle, the central area of the chip surface, insulating protective ring of the original cell structure become no longer symmetry

收稿日期: 2013-08-26。 作者简介: 陈明(1982—),男,博士,工程师。 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50737004)。

网络出版时间: 2013-12-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20131225.1701.002.html>

with small black circles, holes, and cracks. The defects of the contact physical layer decrease downwardly. From baseplate to chip surface, IGBT module flatness of the physical layer exhibits a decreasing trend. The sharp jump position of V_{CE} can be considered as the IGBT reliability evaluation standard.

Keywords: insulated gate bipolar transistor; power cycling; failure; bonded-wire; solder

在各类电力电子装置中,绝缘栅双极型晶体管(IGBT)是目前应用最为广泛的全控型电力电子器件。IGBT工作时产生的功耗主要通过传导垂直向下传递,最后被安装在基板下的散热器带走,从而在芯片与基板间由高到低形成温度分布^[1]。在PWM工作方式下,IGBT模块不断地重复加热、冷却,各层材料反复地加热膨胀和冷却收缩。模块不同层的材料不同,对应的热膨胀系数不同^[2],热膨胀系数小的受到拉应力而拉伸,热膨胀系数大的受到压应力而压缩,热应力长期的反复冲击引起材料属性发生变化,导致IGBT的传热、电气等特性改变,可靠性降低甚至引发封装失效。

IGBT封装失效是在温度梯度与热应力的反复冲击下,由封装材料的疲劳引发的,其中键合引线、键合点、芯片及焊料层是IGBT封装结构中最脆弱的部分,所以其工作寿命主要由键合引线、键合点、芯片及焊料层承受热应力和形变的能力、强度决定。文献[3]提出不同结温波动幅度 ΔT_j 和结温平均值 T_m 对应不同失效类型,即 $\Delta T_j < 80$ K时是焊料层失效, $\Delta T_j \approx 100$ K时是键合引线的上翘失效。文献[4-5]指出, $\Delta T_j \geq 130$ K时主要的失效类型为焊料层疲劳, $\Delta T_j < 130$ K时主要的失效类型为键合引线上翘。明显地,上述文献表述的失效差别很大。

针对封装失效研究,一般通过可靠性功率循环测试、寿命预测和可靠性评估分析来开展^[6]。实验测试的方法是直接通过实验手段对IGBT的可靠性进行测试,有温度循环和功率循环两种,其中功率循环测试更为贴近实际工况,是最主要的可靠性测试方法。IGBT经过高温下的功率循环^[7-8]之后,各层中分层、空洞和缺陷、平整度的变化规律,以及这些变化规律与不同的循环次数之间的关系目前还没有文献给出相关结论。本文针对上述问题开展了高温下IGBT功率循环实验,对实验结果、失效特征及分布规律和失效机理进行分析。

1 IGBT芯片结构及失效类型

IGBT芯片分为硅片层和镀层。镀层镀在硅芯片上表面,由金属层和边缘保护层两部分组成,如图

1所示。中心区域的金属层镀铝,一是保护芯片的完整,还可以减小键合处的热膨胀率,使键合处两端的材料尽可能一致。边缘区域镀 Si_3N_4 ,对芯片起绝缘保护、阻断高压的作用。

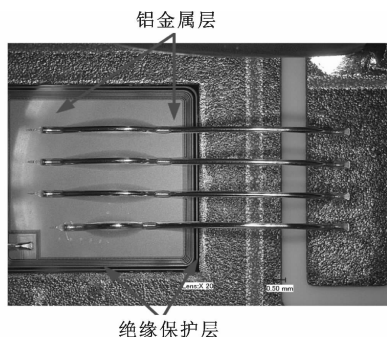


图1 IGBT芯片表面结构

结合IGBT工作的不同阶段,IGBT失效类型及其失效机理如下:①开通阶段的电击穿通常是出现在短路的开通时刻,失效的发生由器件的耗尽层参数以及短路时的电流特性决定;②导通过程中的热击穿一般会有短时的温度累积过程,出现在连续导通一串脉冲后,在短路条件下也可能出现在单个脉冲的导通过程中;③关断时刻的擎柱效应与电击穿;④断态下漏电流引起的热击穿;⑤封装失效是一种与IGBT寿命和可靠性相关的渐变失效,当电应力或热应力的冲击过大时,由于焊料的分层与空洞、键合引线的熔化导致脱焊、金属表面裂缝等,使得器件可靠性下降,引发器件失效^[9-10]。

2 IGBT封装失效类型及其机理

由于芯片和封装材料的热膨胀系数不同,因此会产生不同的热形变,这就是引发封装失效的主要机理。硅芯片的本征温度约为 230°C ,远高于结温最高允许值 175°C 。制约器件最高工作结温的关键因素是封装结构及技术,特别是焊料层、键合引线及键合技术,对应地最主要的封装失效类型^[7]有焊料层疲劳、键合引线上翘和金属镀层重构失效3种,具体如图2所示。

2.1 焊料层疲劳失效

焊接材料包括3个位置:电气端子与铜层的焊

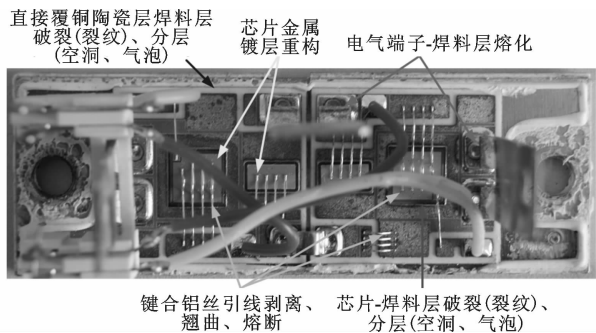


图 2 IGBT 模块主要封装失效位置及类型

接、芯片与铜层的焊接及直接覆铜陶瓷层(DBC)与基板的焊接。由于焊料本身的不均匀性以及焊料焊接的两层材料的热膨胀系数不同,温度波动将引起热应力的反复循环冲击,焊料层之间产生的剪切应力导致薄弱处将逐渐产生细微的裂纹。在应力不超过一定限度时,这些细微裂纹并不影响焊料材料的强度,然而在反复的热应力冲击下,这些细微裂纹将形成裂纹源。随着应力循环次数的增加,这些裂纹逐渐扩展,裂纹长度等级变化率也逐渐增加并随着裂纹加速变大,进而出现分层和空洞,减小了硅芯片热量传导和焊料层的有效传热面积,导致其平均温度升高,加速空洞的产生和封装热阻的增加^[4],散热能力下降,积累在芯片内的热量越来越多,引起局部过热,最终引发器件失效。焊料的最大损伤发生在最高、最低温度之间的变化过程^[11],如果此时应力得不到及时释放,将导致损伤积累,相应的通态压降和损耗增大,在 IGBT 可靠性分析中一般把结壳热阻增加 20% 作为焊料层失效的标准^[12]。

2.2 金属镀层重构失效

芯片硅层和金属镀层的热膨胀系数不同^[2],当循环幅度足够大时,芯片中心位置产生张应力,边缘部位产生剪切力,使已经存在的缺陷可能发展成为裂缝。随后芯片的垂直裂缝和水平裂缝分别在张力和边缘剪切应力的作用下增大。当裂缝在热循环中扩展到临界状态时,芯片就会在没有任何塑性形变的情况下发生失效^[7]。金属镀层的重构减小了芯片与引线的接触面积,加大了接触热阻,电流在芯片表面不均匀分布,引发器件失效。

2.3 键合引线上翘及熔断失效

芯片发射极通过键合引线与 DBC 铜层连接,反复的热应力冲击将引起键合引线与芯片金属镀层材料属性的变异,同时热应力作用不断累积,一旦超过键合引线与金属镀层焊点承受的应力极限值,键合引线将上翘剥离键合点,全部的电流加在剩余的键

合引线上,导致更多的键合引线剥离键合点,直至所有的键合引线上翘。

由于通大电流造成的热过应力、因键合不当造成键合引线上的应力、键合引线与芯片之间的界面上的裂纹、硅的电迁移以及过大的键合压力都会造成引线键合失效^[9]。在高结温波动的实验中,裂纹沿着键合引线小的边界由焊接处两端向中心扩展,当裂纹到达中心后,热应力超出键合处的承受能力,导致键合引线剥离焊盘或翘曲完全脱离焊盘。

3 加速寿命功率循环实验

在常规温度梯度下,由焊料层疲劳引发模块失效发生的周期很长,需要连续循环测试数百甚至上千小时,因此需要开展高结温、大梯度这种极端应用条件下的加速寿命功率循环实验。

3.1 实验原理和实验平台

加速寿命实验是在保持失效机理不变的条件下,把样品放在高应力水平下进行的加速样品失效的一种寿命实验方法^[13]。加速寿命实验原理、IGBT 加速寿命实验电路和加速寿命功率循环实验平台如文献[6]所述。

图 3 所示 IGBT 模块由构成一个桥臂的两只 IGBT 以及反并联二极管组成,IGBT 模块为在某生产厂家定做的打开封装、去除硅胶、型号为 GD50HEL120C1S 的 1 200 V/50 A 模块。图 3 中 IGBT 模块基板涂抹硅脂后安装在水冷散热板上,通过一套水冷散热装置将传递来的热量带走。冷板位于工作芯片正下方的表面开有小槽,槽内放置热电偶测量壳温,通过一台数字万用表进行温度数据采集,同时采用另一台数字表万用测量 IGBT 压降,加热电源采用程控电流源。所有数字表和电流源通过板卡连接到计算机,通过 Labview 程序控制并进行数据采集。

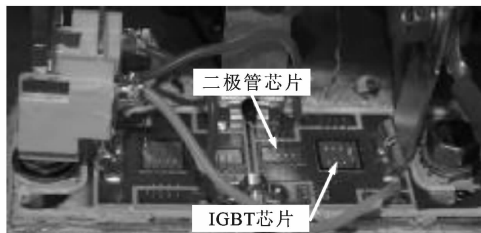


图 3 IGBT 测试模块

IGBT 和二极管都为单芯片,芯片表面有 4 根并联的键合引线连接到上铜层,与外部端子相接。测试时只有一只 IGBT 栅极端子施加 15 V 开通信

号,另一只 IGBT 不工作,栅极被短接。

测试时持续施加开通信号使模块保持在开通状态,通过电流源的开、关来控制模块通、断电流。加热电流为 80~100 A,采样电流为 0.1 A,每 10 s 采样 1 次,占空比 d 设为 6/10,如图 4 所示。模块导通 6 s 后,IGBT 加热后结温上升,关断 4 s 后,IGBT 通过水冷散热又回到初始温度,通过控制加热电流的大小来设定 IGBT 的平均结温及其波动幅度。

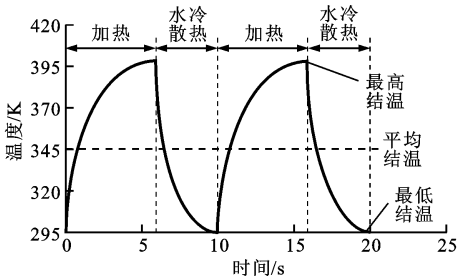


图 4 功率循环测试结温波动

3.2 实验结果

表 1 中每组循环样本数为 5 个,循环次数取算术平均值,误差分布为 9.1%。其中 I_H 为加热电流, d 为占空比, T_{jmax} 为最高结温, N_f 为失效发生时的循环次数。根据表 1 所得实验结果分析 IGBT 寿命分布规律。

表 1 IGBT 功率循环实验数据

I_H/A	T_m/K	$\Delta T_j/K$	T_{jmax}/K	N_f
80	332.0	71.5	367.8	19 500
90	340.7	89.0	385.2	7 560
100	345.4	101.0	395.9	3 960

4 实验结果分析

在温度应力水平 s 下,IGBT 模块的寿命 N_f 服从 Weibull 分布,其分布函数为

$$N_f(t, \alpha, \beta) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta(s)}\right)^{\alpha(s)}\right) \quad (1)$$

式中: α 为形状参数,它直接影响着 Weibull 函数失效密度分布曲线的几何形状; β 为 IGBT 模块的寿命值,它决定着失效密度分布曲线的陡度。

Weibull 分布的失效密度函数为

$$n_f(t, \alpha, \beta) = \frac{\alpha}{\beta^{\alpha}} t^{\alpha-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}\right) \quad (2)$$

采用极大似然估计法对 Weibull 分布函数的形状参数和特征寿命进行估计。Weibull 分布似然函数为

$$L(t, \alpha, \beta) = \prod_{i=1}^m \frac{\alpha}{\beta^{\alpha}} t^{\alpha-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}\right) \quad (3)$$

对式(3)取对数并求导,得到似然方程式如下

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \ln L}{\partial \alpha} &= \sum_{i=1}^m \left[\frac{1}{\alpha} + \ln t_i - \ln \beta - \left(\frac{t_i}{\beta}\right)^{\alpha} \ln \frac{t_i}{\beta} \right] = 0 \\ \frac{\partial \ln L}{\partial \beta} &= -\frac{\alpha}{\beta} + \frac{\alpha}{\beta} \sum_{i=1}^m \left(\frac{t_i}{\beta}\right)^{\alpha} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

经整理化简后可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sum_{i=1}^m (t_i^{\alpha} \ln t_i)}{\sum_{i=1}^m t_i^{\alpha}} - \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^m t_i^{\alpha} &= 0 \\ \beta^{\alpha} &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^m t_i^{\alpha} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(4)、式(5)为超越方程,利用数值迭代方法进行求解 α, β 。根据式(5)并结合表 1 中的实验数据,计算得到各应力下 Weibull 分布函数及相关参数,见表 2,其中 θ 为相关系数, a 为拟合直线斜率。

表 2 实验寿命值 Weibull 分布及相关参数

应力水平		相关参数			
$\Delta T_j/K$	T_m/K	α	β	θ	$a/10^{-3}$
71.5	332.0	1 262.9	9.88	0.993 5	2.94
89.0	340.7	682.3	8.94	0.988 9	2.21
101.0	345.4	308.3	8.30	0.986 7	2.48

由表 2 得到的各应力水平下的 θ 接近于 1,说明 IGBT 模块的寿命值近似服从 Weibull 分布。

5 失效观测及失效特征分布规律

5.1 表面观测

采用高景深三维显微镜 VHX-1000,观察表 1 中第 1 组模块表面键合引线剥离芯片金属镀层、上翘引发的失效过程中芯片表面镀层以及其他各层的变化特征。功率循环前、循环 16 000 次后、循环 18 000 次后、失效后对应的表面观测和芯片晶格显微观测分别如图 5a 和图 6a、图 5b 和图 6b、图 5c 和图 6c、图 5d 和图 6d 所示,功率循环前和失效后绝缘保护环分别如图 7a、图 7b 所示。

比对图 5a~图 5d,经过功率循环多次冲击之后发现模块表面变色,芯片表面由银白色逐渐变成灰白色,DBC 铜层由规则的暗红色变成了出现一些褐红色区域。

从图 6、图 7 比对可以看出,芯片中心区域、边缘绝缘保护环原胞结构均由规则点阵变化为点阵中出现了小的黑圈、空穴、裂纹或裂缝,变得不再规则。

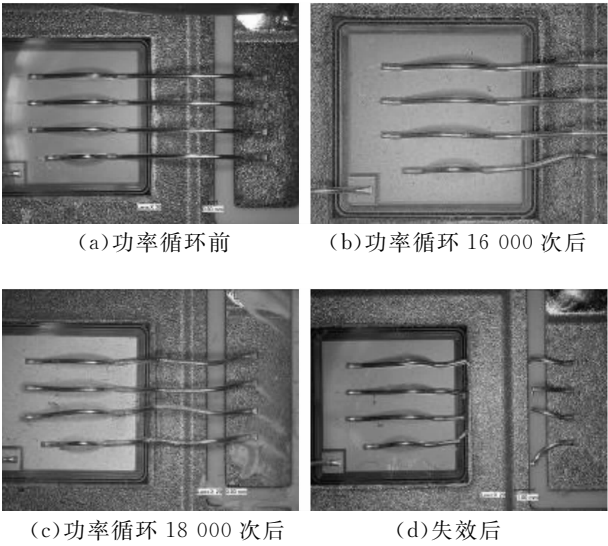


图 5 功率循环前、后模块表面观察

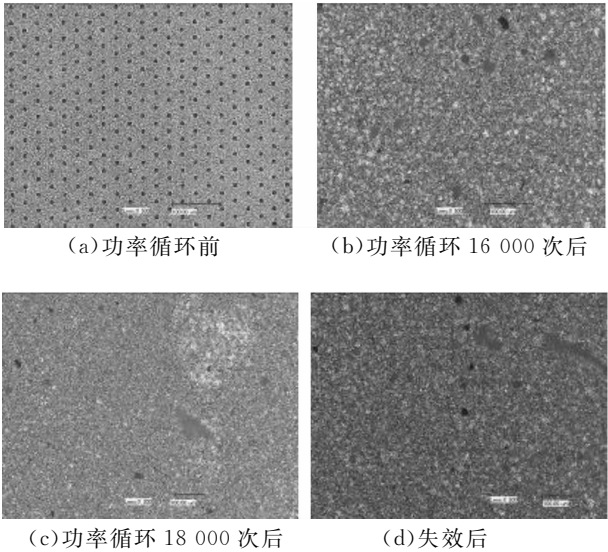


图 6 IGBT 模块功率循环前、后芯片表面微观观察对比

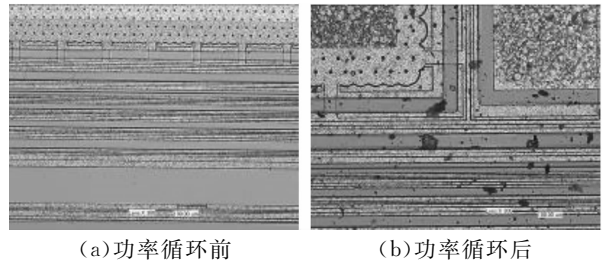


图 7 IGBT 模块功率循环前、后绝缘保护环微观观察对比

这将导致原胞之间接触压力减小,引起原胞之间电阻率和导热系数增大,模块总电阻和结壳热阻相应增加。当疲劳循环数继续增加,将引起模块整体散热能力的进一步下降,在芯片积累更多的热量,使芯片内部结温和表面温度进一步上升,不断地热冲击最终会引发发热击穿,从而引发模块失效。

5.2 键合引线形变观测

表 1 中第 1 组引线的具体形变过程如图 8 所示。功率循环前键合引线如图 8a 所示,经过约 16 000 次冲击之后 1 根键合引线发生轻微形变(见图 8b),功率循环继续,电流分配不均,热应力超出剩下引线承受的极限,导致已经发生形变的引线形变量增大和形变的键合引线根数增多,如图 8c、9d、9e 所示,对应的循环次数分别约为 17 000、17 800、18 300 次。

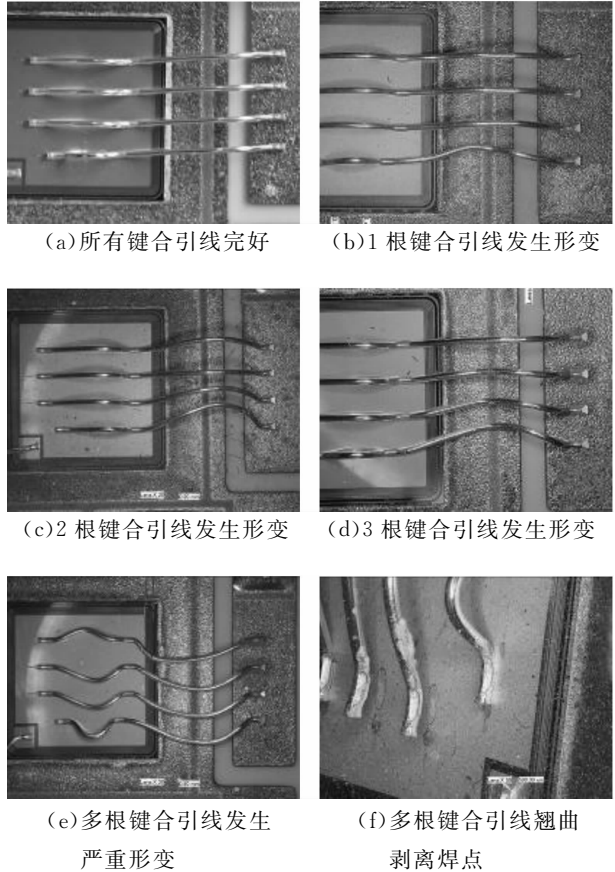


图 8 键合引线形变直至上翘的过程

当键合处的剥离效应加剧,经过约 18 970 次循环后 1 根键合引线剥离键合点,直至经过约 19 500 次循环出现如图 8f 所示的多根键合引线剥离键合点。

5.3 键合引线熔断过程观测

采用一台型号为 Xenics 的高速红外热像仪对 IGBT 芯片表面瞬态温度进行监测和记录。实验发现,IGBT 出现失效的部位都是键合引线,且表现形式为熔断。在熔断瞬间,红外热像仪连续拍摄到的 IGBT 图像及对应的温度分布如文献[6]中图 9、图 10 所示。由文献[6]中图 10 可知,键合引线温度比芯片表面温度最高时高出约 200 ℃。

5.4 焊料层观测

利用超声波扫描显微镜 PVA SAM 300 扫描失

效之后的 IGBT 模块内部分层、空洞、裂纹等缺陷,测试标准采用美国封装电子器件的声显微镜检测标准 IPC/JEDEC J-STD-035。表 1 中第 1、2 组模块失效后检测结果分别如图 9、图 10 所示。

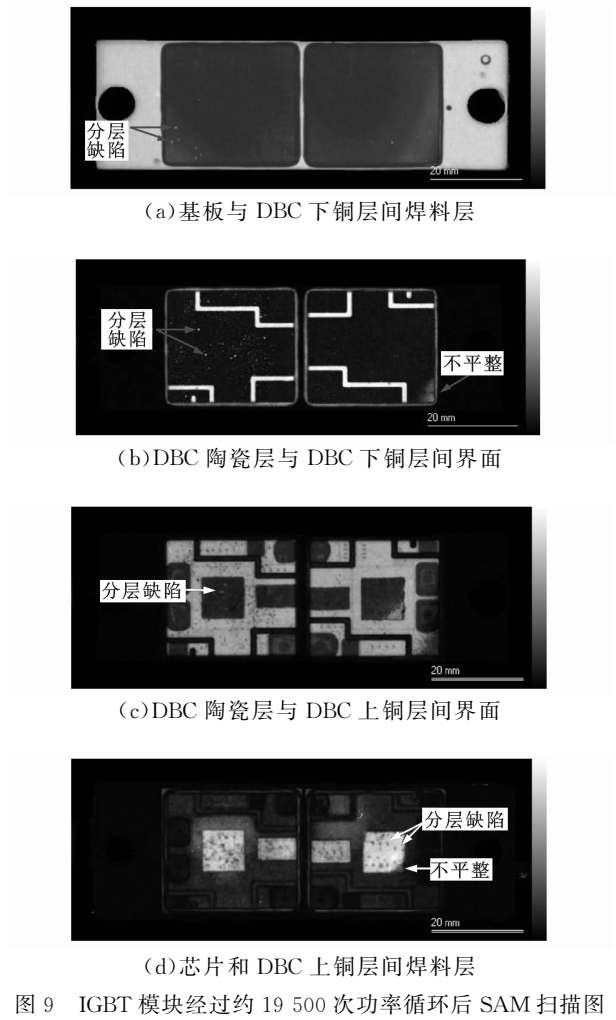


图 9a 中白点为焊料层上的分层缺陷,图 9b 中白点为该层的分层缺陷,模块右侧底部的白色区域为不平整造成。图 9c 中黑影为上层缺陷的投影,白点为该层的分层缺陷。图 9d 芯片中间黑点为该层的分层缺陷。

由图 9 可知,IGBT 模块各层接触面间的缺陷由芯片向下呈递减趋势,上铜层与芯片之间焊料层中的分层缺陷最多。下铜层与基板之间焊料层中的分层缺陷最少,且其分层缺陷基本分布在边缘区域,这是由于边缘区域是热应力集中的区域导致的。其他各层的分层缺陷分布具有一定的分散性。对比图 9 和图 10 可以发现,随着循环次数的增多,各层的分层缺陷增加得并不多。这表明在实验所设定的工作条件下,当键合引线翘曲引发失效时,焊料层发生的变化不大,还未达到由于焊料层疲劳引发失效的程度。

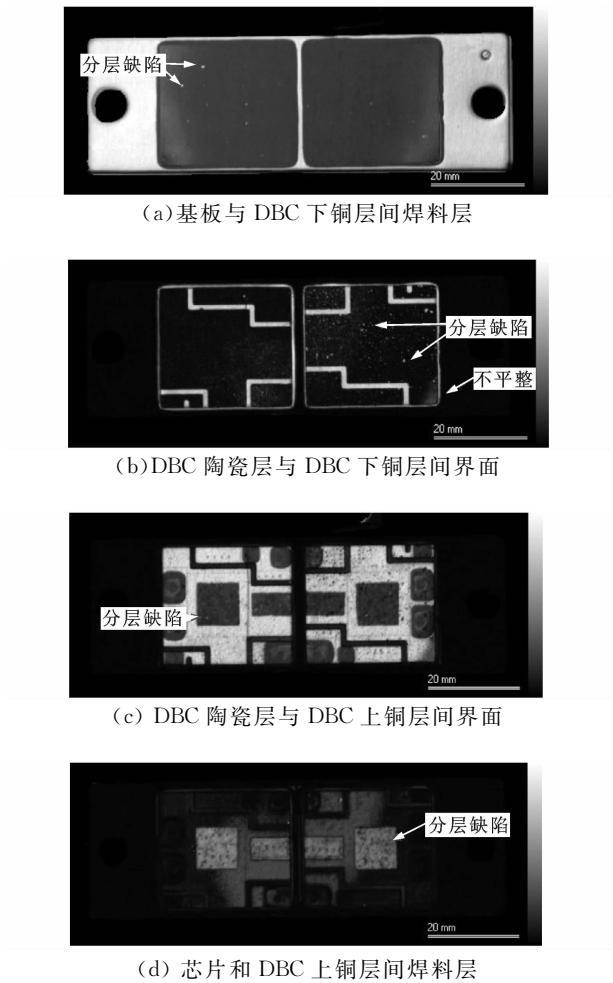


图 10 IGBT 模块经过约 7 560 次循环失效后 SAM 扫描图

对测试模块进行不平整度扫描如图 11 所示。评估标准采用美国固态表面封装器件的受潮-吸潮状况的分类标准 IPC/JEDEC J-STD-020C。

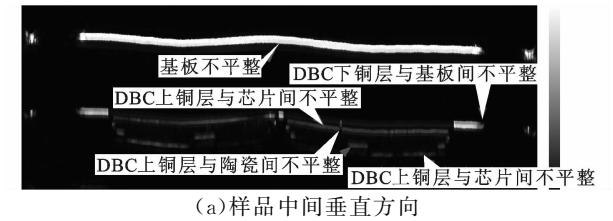


图 11 整个样品不平整度扫描图像

由图 11 所示,IGBT 模块各物理层不平整度由基板向上呈递减趋势,即基板不平整度最大,且集中在正对工作芯片区域的边缘位置。这主要是由于基

板是一块完整铜板,而 DBC 以及芯片均是切割后的小块,受热冲击面积小。

5.5 电气、传热特性参数测量

以表 1 中第 1 组加速寿命循环实验为例,对 IGBT 模块的结温、壳温、 V_{CE} 以及热阻参数的变化进行了实时监控,变化如表 3 所示。

表 3 实验中各参数的变化情况

循环次数	T_{jmax} / °C	T_m / °C	最高壳温 / °C	V_{CE}/V	热阻 / °C · W ⁻¹
1	95	65	30	2.44	0.22
15 330	95	65	30	2.48	0.22
18 000	96	67	30	2.52	0.22
18 300	97	70	30	2.55	0.22
18 620	99	71	31	2.58	0.22
19 000	99	71	31	2.62	0.22
19 300	100	72	32	2.66	0.23
19 500	101	72	32	2.70	0.23

从表 3 数据可以看出,随着循环次数的增加,IGBT 压降值逐渐增大,临近失效前比初始状态增大了约 10.7%。由于压降增大,产生的功耗增加,结温和壳温都略有升高,但是计算得到的热阻几乎没有变化,与一般温度下由热阻增大引起温度和压降升高,从而引发失效的现象不同。这是由于在高温循环冲击下,IGBT 首先是芯片表面金属层与键合引线的材料特性发生变化,引起压降增大,而焊料层还没有开裂或空洞出现,只是出现微小的缺陷,因此热阻基本没有变化。此时温度的升高是由于压降增大引起功耗的增大,而不是热阻增加引起散热性能下降,在失效机理上是完全不同的。

由表 3 还可以看出,测试开始时压降基本不变,当接近失效时,压降急剧增大,即 $d(\Delta V_{CE})/dt$ 很大,存在变化的转折点。因此,可将压降的突变位置作为可靠性评估的标准,约为 2.52 V,即压降增大约 3%。

6 结 论

(1)高温功率循环实验结果表明:高结温、大温度梯度极端工作方式下,IGBT 封装失效类型主要是键合引线翘曲与熔化,由于键合点两端材料热膨胀系数失配,在温度波动过程中产生剪切应力,导致键合引线剥离芯片金属层,引起电流分配不均,进而可能会出现所有键合引线均上翘。

(2)键合引线失效改变了芯片表面结构,导致芯片金属镀层钝化或重构,因此不可避免地对一些关键电气参数产生很大影响,如 V_{CE} 在此种失效类型

下变化很大。在失效标准里将其变化 5% 作为判断标准^[14],文献[15]定义的失效标准为: V_{CE} 有 10% 的变化,芯片下焊料层有 50% 的面积出现分层,衬底焊料层处有 20% 的面积出现分层,铝丝键合引线剪切应力下降 90%。实际上后 3 个量很难测量,在实际实验过程中发现, V_{CE} 失效前会增大 7%~10%,且失效前 $d(\Delta V_{CE})/dt$ 很大,而热阻基本不变,可将压降的突变位置作为 IGBT 可靠性评估的标准。

(3)采用高景深三维显微镜、高速红外热像仪和超声波扫描显微镜,对实验过程中以及模块失效后的表面显微结构,键合引线形变翘曲和熔断过程以及各层分层、空洞和缺陷进行观测。对应的失效特征分布规律表明:经过功率循环后的芯片表面中心区域、边缘绝缘保护环原胞结构均由规则点阵变化为点阵中出现了小的黑圈、空穴、裂纹或裂缝,变得不再规则;各物理层接触面间的缺陷由芯片向下呈递减的趋势;IGBT 模块各物理层不平整度由基板向上呈递减的趋势。

(4)通过分析得到 IGBT 模块的寿命值近似服从 Weibull 分布。

参考文献:

[1] MASANA F N. A new approach to dynamic thermal modelling of semiconductor packages [J]. Microelectronics Reliability, 2001, 41(4): 901-912.

[2] OUKAOUR A, TALA-IGHIL B, POUDEROUS B, et al. Ageing defect detection on IGBT power modules by artificial training methods based on pattern recognition [J]. Microelectronics Reliability, 2011, 51(1): 386-391.

[3] MOROZUMI A, YAMADA K, MIYASAKA T, et al. Reliability of power cycling for power semiconductor modules [J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2003, 39(3): 665-671.

[4] AMRO R, LUTZ J. Power cycling with high temperature swing of discrete components based on different technologies [C] // IEEE PESC. Piscataway, USA: IEEE, 2004: 2593-2598.

[5] BRYANT A T, MAWBY P A, PALMER P R, et al. Exploration of power device reliability using compact device models and fast electro-thermal simulation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(3): 894-903.

[6] 陈明, 胡安, 刘宾礼. 绝缘栅双极型晶体管失效机理与寿命预测模型分析 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(10): 65-71.

- CHEN Ming, HU An, LIU Binli. Investigation on failure mechanism and lifetime prediction modeling of IGBT power electronic devices [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(10): 65-71.
- [7] LUTZ J, SCHLANGENOTTO H, SCHEUERMANN U, et al. Semiconductor power devices-physics, characteristics, reliability [M]. New York, USA: Springer, 2011: 380-412.
- [8] SMET V, FOREST F, HUSELSTEIN J J, et al. Ageing and failure modes of IGBT modules in high temperature power cycling [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4931-4941.
- [9] TOUNSI M, OUKAOUR A, TALA-IGHIL B, et al. Characterization of high-voltage IGBT module degradations under PWM power cycling test at high ambient temperature [J]. Microelectronics Reliability, 2010, 50(8): 1810-1814.
- [10] YANG S Y, XIANG D W, BRYANT A, et al. Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: a review [J]. IEEE Transaction on Power Electronic, 2010, 25(11): 2734-2752.
- [11] 刘勇, 梁利华, 曲建民. 微电子器件及封装的建模与仿真 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 15-16.
- [12] HAMIDI A, BECK N, THOMAS E. Reliability and lifetime evaluation of different wire bonding technologies for high power IGBT modules [J]. Microelectronics Reliability, 1999, 39(5): 1153-1158.
- [13] 赵宇, 杨军, 马小兵. 可靠性数据分析教程 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009: 171-172.
- [14] XIONG Y, CHENG X, SHEN J, et al. Prognostic and warning system for power-electronics modules in electric, hybrid electric, and fuel-cell vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(6): 2268-2276.
- [15] LU H, BAILEY C. Lifetime prediction of an IGBT power electronics module under cyclic temperature loading conditions [C] // International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 274-279.

(编辑 杜秀杰)

(上接第46页)

- character of DC trees in polymethylmethacrylate [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1991, 26(6): 1159-1162.
- [15] VAUGHAN A S, HOSIER I L, DODD S J, et al. On the structure and chemistry of electrical trees in polyethylene [J]. J Phys: D Appl Phys, 2006, 39(5): 962-978.
- [16] 陈向荣, 徐阳, 刘英, 等. 交联聚乙烯电缆绝缘材料中电树枝的导电特性研究 [J]. 物理学报, 2012, 61(8): 087701.
- CHEN Xiangrong, XU Yang, LIU Ying, et al. Study on conducting characteristics of electrical trees in cross-linked polyethylene cable insulation [J]. Acta Phys Sin, 2012, 61(8): 087701.
- [17] SHIMIZU N, LAURENT C. Electrical tree initiation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(5): 651-659.
- [18] FUKAGAWA H, MIYAUCHI H, YAMADA Y, et al. Insulation properties of 250 kV DC XLPE cables [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(7): 3175-3184.
- [19] KHALIL S M. The role of BaTiO₃ in modifying the DC breakdown strength of LDPE [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(2): 261-268.
- [20] ANDRIANJOHANINARIVO J, WERTHEIMER M R, YELON A. Nucleation of electrical trees in polyethylene [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1987, 22(6): 709-714.
- [21] BAUMANN T H, HIBMA T, PFLUGER P, et al. Experimental evidence for charge injection. A pre-breakdown mechanism in polymers [C] // Proc 2nd Int Conf on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics. Piscataway, USA: IEEE, 1986: 131-136.
- [22] JIANG G, KUANG J B, BOGGS S. Critical parameters for electrical tree formation in XLPE [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(2): 292-296.
- [23] ZHANG Yewen, LEWINER J, ALQUIÉ C, et al. Evidence of strong correlation between space-charge buildup and breakdown in cable insulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(6): 778-783.
- [24] 郑飞虎, 张治文, 肖春. 聚合物电介质的击穿与空间电荷的关系 [J]. 材料科学与工程学报, 2006, 24: 316-320.
- ZHENG Feihu, ZHANG Yewen, XIAO Chun. Relationship between breakdown in polymer dielectrics and space charge [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2006, 24(2): 316-320.

(编辑 杜秀杰)