

技
术
专
题

功率 IGBT 模块的可靠性分析

王彦刚, Jones Steve, 刘国友

(株洲南车时代电气股份有限公司 功率半导体研发中心, 英国 林肯 LN6 3LF)



作者简介: 王彦刚(1974-), 男, 博士, 高级工程师, 目前主要从事新型功率 IGBT 模块的设计封装及可靠性分析等工作。

摘 要: 介绍了功率模块的现状、封装过程、可靠性及其失效规律, 论述了研究模块可靠性的标准试验方法如耐力试验和环境试验, 讨论了模块的主要失效机制如键合引线失效、表面金属化重建、焊料疲劳和衬底分层等。

关键词: IGBT 模块; 可靠性; 可靠性试验; 失效机制; 寿命

中图分类号: TM464; TN34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2013)01-0005-05

Reliability Analysis of Power IGBT Modules

WANG Yan-gang, Jones Steve, LIU Guo-you

(Power Semiconductor R&D Center, Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Lincoln, LN6 3LF, United Kingdom)

Abstract: Firstly, the module concept, packaging procedures, reliability and failure rules was presented. Then, the standard tests methodologies for investigating module reliability including endurance and environment tests were discussed. Lastly, the main failure mechanisms such as wire bonds failure, chip metallization reconstruction, solder layer fatigue and substrate delamination were studied.

Key words: IGBT module; reliability; reliability test; failure mechanism; life

0 引言

功率半导体模块是将功率器件按一定功能组合封装成一个整体。它比分立器件的电流和功率处理能力更高, 为器件提供更好的物理保护和散热途径, 能够在很大程度上拓展器件的应用领域并延长使用寿命。上世纪 70 年代, 双极模块投入市场, 其后, 功率 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) 和 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 模块相继投入使用^[1]。

功率模块是由不同材料组成的多层结构, 包含芯片、绝缘衬底和散热基板等, 它们之间是通过焊接层连接在一起的。此外, 还包括芯片键合引线、模块与外部连接的端子, 以及硅胶、环氧树脂和外壳等保护结构^[2]。模块系统在应用中的长期可靠性受到多方面的影响, 例如结构、制造工艺、材料、应用条件及环境因素等。提高功率模块可靠性的需求已经成为研发人员设计新型模块的最大动力, 特别是牵引系统、电力

传输和配电系统的应用需求。由不同国家的工业界和学术界合作的一系列可靠性研究项目已经展开。例如由欧盟资助的铁路牵引应用中的功率半导体、应用于铁路和汽车电子中的高温 IGBT 和 MOSFET 模块等^[3]。

基于特定任务需求, 研究人员认为应用于铁路牵引系统中 IGBT 模块的使用寿命应该至少为 30 年, 失效率不能超过 100FIT (1FIT=1/10⁹h)^[1]。功率模块的可靠性包含半导体器件以及封装的可靠性两个方面, 器件的可靠性包括栅介质可靠性、过电流和过电压损坏以及静电损坏等^[4]。封装引起的可靠性问题包括芯片键合引线脱落及根部破裂、焊料层蠕变及疲劳失效和绝缘衬底分层等^[3]。

本文主要讨论与封装相关的可靠性问题, 引起封装失效的主要原因是功率模块在运行过程中经历的主动的和被动的温度波动, 次要原因是振动和湿度等因素。由于封装材料的热膨胀系数 (CTE: Coefficient of Thermal Expansion) 差别, 导致不同材料在相同温度波动中所受的热应力和产生的应变不同, 应变量随时间积累会引起材料的永久性移动或者变形, 进而引发模块失效。

1 IGBT 模块及其封装

目前,电力电子器件的模块化、集成化和智能化是其主要发展方向。模块化将实现一定功能的电路封装在一起,在增加电流和功率处理能力的同时,可以减小设计周期,使尺寸紧凑,增加器件及应用系统的可靠性。集成化将驱动、控制、通信电路以及散热系统集成在模块上,进一步实现系统的小型化,减小互连结构的寄生参数。智能化在模块中引入检测元件,其过载信号通过驱动板转换成相应的电信号,通过外部控制系统实现对模块的保护。

图1是Dynex公司的3 300 V/1 200 A IGBT模块外观和电路结构,它包含3个含有反并联二极管的IGBT开关,一般并联使用,应用场合为逆变器、电机调速、机车牵引和斩波等。

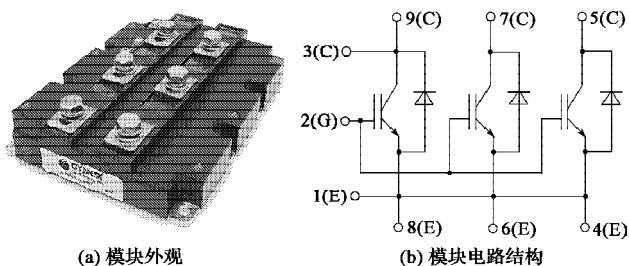


图1 Dynex 3 300 V/1 200 A IGBT 模块

传统IGBT模块的封装过程如图2所示。

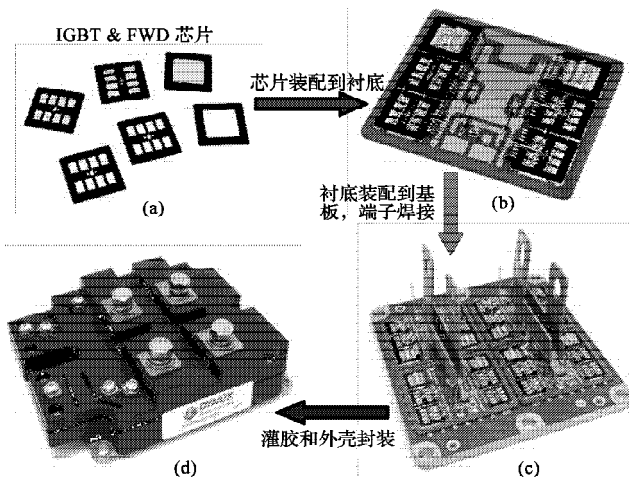


图2 IGBT 模块的封装过程

首先,根据设计规格如电压电流等级、功率、频率、效率、温度、尺寸等选择IGBT和续流二极管(FWD: Free Wheeling Diode)芯片,见图2(a)。

其次,根据电热均匀性原则设计芯片在绝缘衬底(DCB: Direct Copper Bonded, 直接铜键合)上的布局。DCB作为电路的支撑结构,其下表面为铜,上表面为铜形成的电路板结构,根据设计模式刻蚀而成。根据设计布局,芯片首先被焊接(或烧结)到DCB表面。目前,传统的锡铅焊料已经基本被无铅焊料取代。随着对IGBT模块工作温度需求的提高,人们需要探索具有更高熔点的焊接材料。芯片固定到DCB上后,进行引线键

合。根据电流大小,设计键合引线的数目,从IGBT芯片表面(发射极和栅极)和FWD芯片表面(阳极)采用超声键合工艺,将芯片连接到衬底上,见图2(b)。键合引线一般是铝材料,但逐步向铜或者铝复合铜材料发展。

第三,经过芯片焊接和引线键合的DCB被焊接到金属基板(或散热器)上,见图2(c)。基板为DCB提供机械支撑,还能吸收热量并把热量传输到散热系统。基板材料必须有很高的热导率和平整度,一般采用热导率较高的铜板,重量轻而且热特性很好的AlSiC,以及铜钼、铜钨、石墨纤维增强的绿铜合金等。

DCB焊接到基板上以后,进行功率端子、辅助端子和信号端子的连接,见图2(c)。端子材料应具有高的机械强度、低电阻、不易变形、不易老化等特性,一般采用铝、铜合金或镍合金材料。

最后,整个基板被封装到塑料外壳中,见图2(d)。模块内部注入硅胶以减少环境因素(湿度、振动等)对芯片和键合引线的影响,硅胶还可以起到电绝缘的作用。对于将辅助端子和信号端子连接到印制电路板(PCB Printed Circuit Board)上的模块,PCB上填充环氧树脂以增加保护强度。

2 功率半导体模块的可靠性概论

可靠性指产品在规定的条件下,规定的时间完成规定功能的能力,该产品可以指任何系统、设备和元器件。IGBT模块和一般电子器件、组件的失效率曲线类似图3所示的浴盆曲线^[1,4-5]。该曲线将器件或系统的失效区域分成3个阶段,即早期失效,偶然失效以及和时间相关的耗损失效。

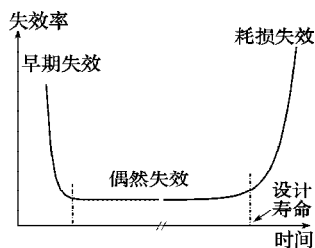


图3 半导体器件和设备失效率随时间的变化曲线

2.1 早期失效

早期失效率随时间下降,对于IGBT模块来说,引起早期失效的原因有器件(IGBT和FWD)制造过程中引入的缺陷如灰尘粘附,晶格缺陷等;绝缘衬底的破裂;芯片键合引线的接触不良以及人为失误等。这些缺陷和失误可以通过改善芯片设计、制造工艺、模块结构设计以及封装工艺技术来减小,然而要完全消除它们是不太可能的。大部分具有早期失效的模块可以在制造、检测和筛选过程中被发现并淘汰,而一些具有微小缺陷的模块可能较难被发现。这些模块在实际应用中由于温度和应力的影响可能失效较快。出厂前对产品施加应力去除一些具有固有缺陷的产品,不但可以改善产品上市后的早期失效率,而且能够在产品进入耗损失效阶段前使产品维持长时间的高可靠性。

2.2 偶然失效

经过较高的早期失效阶段后,产品的失效率呈现

较大程度的回落,并在较长时间内基本保持稳定,此阶段为偶然失效阶段。在此期间,半导体器件或系统的失效率非常低,也没有特定的机制。偶然失效也被认为处于早期失效的延长期内,失效产品可能含有一些极其微小的原始缺陷,这些缺陷在经过相当长的时间后被诱发。该阶段长短随模块及其系统的使用条件和环境而变化。一般认为,偶然失效可能由宇宙 α 射线或其他高能粒子入射而引起,或者由人为失误使模块的工作条件超过了它的最大额定值(如过电压、过电流和过热等)而引起。

在应用设计中,半导体器件和模块的参数选择要留有充分的裕量。一般其使用电压要在最大额定值的50%~60%以下,工作温度在最大结温的70%~80%以下^[1],还要综合考虑器件/模块和电路系统、环境条件等因素。

2.3 耗损失效

随工作时间的延长,失效率呈现指数增加的趋势,系统进入耗损失效阶段。此时,失效由材料疲劳、损耗及老化引起,如半导体材料、互连层及引线、氧化层等,该阶段受产品的工作条件影响。偶然失效期越长,耗损失效出现得越晚,产品或系统的可靠性越高。为确保IGBT模块的长期可靠性,要将产品的寿命设计在偶然失效期内。此时,产品未进入耗损失效期,可靠性很高。

在耗损失效期,失效率随时间剧增,直到所有的元件都被损坏。器件或模块的耗损失效寿命可以通过加速应力试验预测。在正常工作条件下,其寿命一般长达十几年以上,所以在可靠性研究中,一般通过增加电应力(电压和电流)和温度的方法,加速产品老化而快速获得高应力条件下的寿命,然后通过外推,计算相同失效机制下,产品在正常工作条件下的寿命。

3 IGBT 模块的可靠性

由于IGBT模块结构上的复杂性,其可靠性依赖于各组成部分的材料属性,以及各部分对外部和内部应力的反应。影响IGBT模块长期可靠性(耗损失效)的主要因素是器件在打开、导通、关断过程中功率损耗引起的结温变化、环境温度和湿度的变化等。由于CTE的差别,不同材料在温度波动和存在温度梯度时所受的热应力和产生的应变不同,这是一个热-机械过程。模块失效是由于应变随时间的积累引起的材料永久性移动或变形。

为确保模块的长期可靠性,制造商需要进行一系列的可靠性试验及设计验证,主要包括耐力试验和环境试验等。

3.1 耐力试验

耐力试验包括高温反偏压试验、高温栅应力试验、温度湿度偏压试验以及间歇工作寿命试验如功率循环

(PC: Power Cycling) 试验等。

高温反偏压试验(HTRB: High Temperature Reverse Bias Test)可以评估芯片漏电流的稳定性。试验条件为:环境温度150℃,反偏压略低于阻断电压($V_{CE}=-0.8V_{CES}$),栅源电压(V_{GE})为0,时间1 000 h^[5-6]。该试验是快速加速过程,可以发现器件边缘及钝化层的场耗尽结构中的缺陷和退化现象,6星期内产生的应力相当于实际应用20年以上的应力总和。

高温栅应力试验(High Temperature Gate Stress Test)能够评估芯片栅漏电流的稳定性。试验条件为:环境温度150℃, $V_{CE}=0$, $V_{GE}=\pm 20$ V,时间1 000 h^[5-6]。理想的栅氧化层内部没有缺陷,表面电荷密度很低,栅漏电流一般小于10 nA,而且对芯片表面污染相当敏感。

温度湿度偏压试验(Temperature Humidity Bias Test)用于评估湿度对功率组件长期可靠性的影响。试验条件为:环境温度85℃左右,相对湿度85%左右, $V_{CE}=0.8V_{CES}$, $V_{GE}=0$,时间1 000 h^[5-6]。尽管模块被密封起来,而且芯片和键合引线被硅胶覆盖,但是水汽可以通过这些材料渗透。因此,湿气可以由外界到达芯片表面及钝化区。该试验能够检测芯片钝化的缺陷并研究封装材料中与湿度相关的退化过程,所加电场可以促进芯片表面的离子和极性分子的积聚而加速退化。

3.2 功率循环试验

PC试验是耐力试验的一种,之所以单独列出来,是因为它是模块可靠性研究最重要的测试之一。试验时产生重复的温度变化直到它失效,芯片温度上升由其功率损耗引起,这是一个主动温度循环过程。将IGBT模块安装在散热器上,打开IGBT使其通过较大负载电流,损耗由开关和通态损耗组成,损耗产生的热量引起芯片温度上升。当达到设定的最高温度 $T_{j\max}$ 时,关断IGBT,芯片温度随时间下降到设定的最低温度 $T_{j\min}$,完成一个PC过程。温度变化的幅度($\Delta T_j=T_{j\max}-T_{j\min}$)影响热应力和材料的疲劳老化程度,IGBT模块的寿命依赖于工作和环境条件。PC试验温度曲线如图4所示。试验中监测IGBT的正向压降 V_{CE} ,测量功率损耗并计算模块芯片到散热器的热阻(R_{thj-h})。模块失效的判定依据一般是 V_{CE} 增加5%,热阻增加20%以及器件失效如体击穿、栅源击穿等^[1, 5-6]。

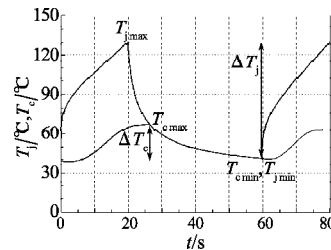


图4 PC试验中结温和外壳温度变化情况

模块失效前经历的PC次数称为PC试验寿命(N_f),通过试验可以得到 $N_f-\Delta T$ 曲线。该曲线分两类,一是 N_f 与结温变化幅度(ΔT_j)的关系, N_f 由 ΔT_j 引起的键合引线及芯片底部焊料失效决定,模块寿命不仅取决于 ΔT_j ,而且受散热器温度影响。另一类是 N_f 与外壳温度变化幅度(ΔT_c)的关系,试验时对所有IGBT通电,使整

个外壳温度均匀变化。失效主要由 ΔT_c 决定, 需要较长的周期时间, N_f 主要由 DCB 下面焊料疲劳失效决定^[5-6]。

3.3 环境试验

环境试验包括高低温存储试验、温度湿度存储试验(无偏压)、温度循环(TC: Temperature Cycling) 和热冲击(TS: Thermal Shock)试验等。

高低温存储试验用于评估模块材料如塑料、橡胶、钝化芯片的有机材料和硅胶等的特性、强度和可靠性。标准试验条件为: $-40^{\circ}\text{C}/125^{\circ}\text{C}$, 时间 1 000 h^[5-6]。随着模块新应用的开发, 该试验的温度范围需适当增加。

温度循环和热冲击试验用于模拟应用中环境温度变化对模块的影响。二者的差别在于温度变化率不同, TC 试验的温度变化率为 $10\sim 40^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 而 TS 试验时通常在 1 min 内完成环境温度改变(图 5)。TS 试验通过气体或液体加热及冷却模块, 使用液体的效率远高于气体。TC 试验的周期要足够长, 以便模块的所有部分均能达到设定温度, 比较试验前后模块的电学热学参数可判定模块的失效及其寿命。

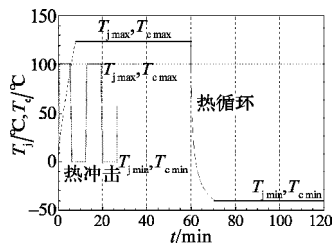


图 5 TC 和 TS 试验中的温度变化情况

此外, 模块的可靠性测试还包括机械振动和冲击试验。

4 IGBT 模块的主要失效机制

IGBT 模块的失效主要是温度变化导致的热应力引起的连接层的机械应变和变形, 其中热应力是由材料之间 CTE 不一致产生的。在模块工作及存储过程中, 主动和被动的温度循环及各层之间的温度梯度使不同材料的形变程度不同, 连接部分受到不同的应力, 引发互连层的疲劳和蠕变^[3, 6]。图 6 是典型的 IGBT 模块的结构剖面图和材料的 CTE。IGBT 模块的主要失效机制有键合引线失效、芯片表面金属化重建、焊料疲劳和 DCB 衬底分层等。

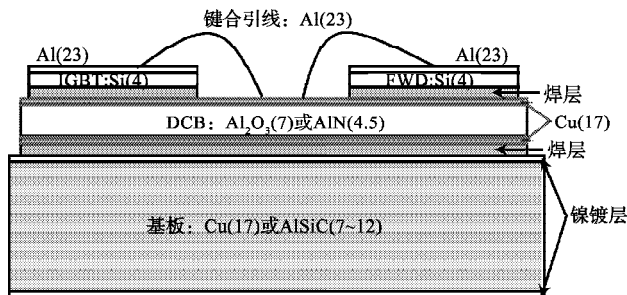


图 6 IGBT 模块结构剖面图(括号内数字为材料的 CTE)

4.1 键合引线失效

模块中有大量的键合引线, 而且多于半数的键合点在芯片之上。引线在 PC 过程受到温度变化及其自身

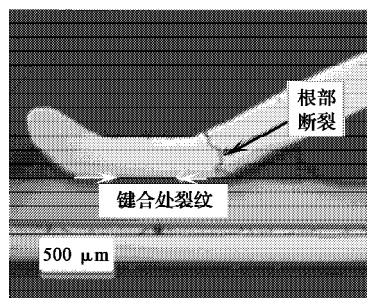
发热的影响, 造成引线和键合点之间的切变应力和引线不断弯曲变形, 其失效形式主要是键合引线的剥离和根部断裂, 可以导致接触电阻改变和电流重新分布, 表现为饱和压降的改变。

引线脱落主要发生在芯片表面, 与 DCB 表面的键合则很少脱落, 这是因为 DCB 表面温度变化幅度较小, 而且铝线与 DCB 表面铜的 CTE 接近。当结温变化时, 铝线与芯片 CTE 的差别产生应力作用, 在这个结合面上产生龟裂, 随龟裂发展最终形成剥离, 图 7(a) 显示键合引线脱落情况^[7]。2 种技术可以改善键合引线的剥离失效, 一是在芯片表面制造一层铝铝缓冲层, 通过缓解铝和芯片 CTE 的不匹配而消除热-机械疲劳; 二是采用加固的方法阻止键合引线脱落, 如在键合点上涂上一层或几层不同硬度的有机材料, 能够显著地提高键合引线的寿命。



(a) 引线脱落

如超声键合过程不完善, 长时间试验后能够发现键合引线根部断裂的情况, 如图 7(b)^[6]。引线根部断裂一般比脱落发生得晚, 而且容易发生在铝线被键合工具损坏的情况下。



(b) 根部断裂

图 7 PC 引起的键合引线脱落及根部断裂

4.2 芯片表面金属化重建

芯片与其表面的铝金属化层的 CTE 存在较大的差异, 在 PC 和 TC 过程中, 铝层受到很大的应力。该金属化层是在真空条件下形成的颗粒结构, 容易在应力作用下发生重建。研究发现温度高低、温度变化幅度和颗粒大小影响表面重建的程度^[3, 6]。当结温高于 110°C 时, 重建的机制是压缩应力下材料疲劳导致的颗粒塑性变形。塑性变形使某些颗粒突出, 引起表面粗糙度增加。在降温阶段, 颗粒受张力使边界出现空洞。这些变化都使表面金属化层的电阻增大。图 8 显示 PC 试验前后表面金属化层的重建情况^[8]。

4.3 焊料层疲劳老化

焊料层热-机械疲劳是 IGBT 模块 PC 试验中一个主要的失效机制。焊料疲劳由其界面发生破裂导致, 引起热阻增加, 使结温上升, 器件功耗增加, 加速器件失效^[3, 10-11]。一般认为, DCB 与传统铜基板间的焊层更易失效, 因为二者的 CTE 存在较大差别。然而, PC 试验中

由于芯片与DCB之间的温度差别更大,二者之间焊料的失效也要引起重视。除了焊料疲劳失效,焊层的空洞也引起模块失效。较大的空洞使热传导不均匀,传热效率降低。图9是PC试验后焊料层疲劳失效情况^[6]。试验证明,SnAg焊料的TC循环稳定性比SnPb好^[6]。通过改变绝缘衬底和基板材料,使材料之间CTE更加匹配,或者采用更加稳定的连接技术如银烧结能够改善焊料层的TC能力^[9]。

4.4 DCB衬底分层

DCB是指铜箔在高温下直接键合到 Al_2O_3 或 AlN 陶瓷基片表面的特殊工艺,DCB衬底具有优良的电绝缘、高导热、优异的软钎焊和高附着强度等特性,一般采用双面键合。电路结构上面的铜片被刻蚀成所需要的图形,起载流作用,下面的铜片与散热基板连接,增进散热能力。由于DCB衬底是由2种材料组成的3层结构,而且材料的CTE差别较大,在PC和TC过程中,材料热膨胀程度不同导致连接层承受热应力。随时间增长,连接层被破坏,导致铜与陶瓷片剥离,这就是衬底的分层效应,如图10^[12-13]。虽然 AlN 可以进一步减小衬底与芯片之间CTE的不匹配,但会增加DCB的分层效应。在下层铜片边缘刻蚀一些小孔能够减小热应力并增强温度循环能力^[12]。

此外,IGBT模块的失效机制还包括材料脆性及疲劳引起的裂纹、腐蚀、烧毁(如门锁、宇宙射线辐射等)

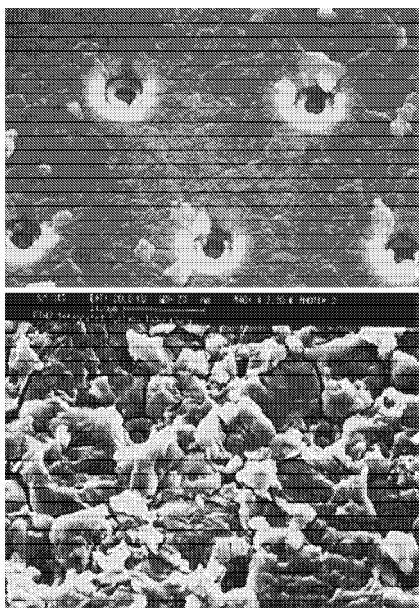


图8 PC试验前后表面金属化层的变化

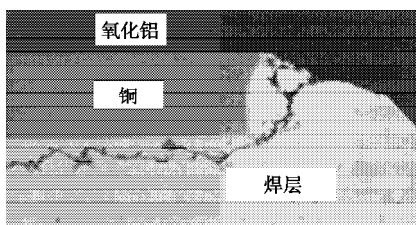


图9 PC试验后焊料层的失效

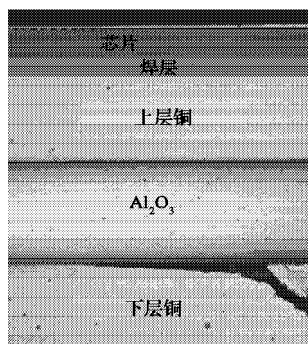


图10 PC试验后DCB衬底分层情况

等。

5 结语

本文对IGBT模块的现状、封装过程和工艺技术进行了概述,讨论了模块的可靠性及其失效规律。为满足系统寿命要求,设计者要保证模块在系统应用期间工作在偶然失效区,而不能进入耗损失效阶段。然后论述了模块可靠性的耐力试验和环境试验,以及功率循环和温度循环等加速老化试验方法。最后讨论了IGBT模块失效的物理原因,即不同材料在温度变化时膨胀程度不同导致材料所受热应力不匹配,引起材料的机械疲劳、老化和变形,其主要失效机制有键合引线的脱落和根部断裂、芯片表面金属化层重建、焊料层疲劳以及绝缘衬底分层等。

参考文献:

- [1] Power Module Reliability[EB/OL][2012-11-06] <http://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/products/powermod/reliability/index.html>.
- [2] Pluschke N. State-of-the-art Power Module Design for Renewable Energy Application[J]. Journal of International Council on Electrical Engineering, 2012, 2(1): 79-83.
- [3] Mauro Ciappa, Selected failure mechanisms of modern power modules[J]. Microelectronics Reliability, 2002, 42: 653-667.
- [4] Semiconductor Quality and Reliability Handbook, Chapter 2 Semiconductor Device Reliability Verification[M/OL][2012-11-06] <http://www.sony.net/Products/SC-HP/tec/catalog/qr.html>.
- [5] Fuji Electric Co., Ltd. IGBT Modules Application Manual, Chapter 11 Reliability of power module[EB/OL][2012-11-06] http://www.fujielectric.com/products/semiconductor/technical/application/igbt_app_manual.html.
- [6] Lutz J, Schlangenotto H, Scheuermann U, Doncker R D. Semiconductor Power Devices, Physics, Characteristics, Reliability[M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011: 380-409.
- [7] IGBT Module Reliability[EB/OL][2012-11-06] http://www.dynexsemi.com/products/application_note/igbt.htm.
- [8] Hamidi A, Kaufmann S, Herr E. Increased Lifetime of Wire Bond Connections for IGBT Power Modules[C]. Anaheim: 16th IEEE Applied Power Electronic Conference and Exposition (APEC), 2001: 1040-1044.
- [9] Lefranc G, Licht T, Schulta H J, Beinert R, Mitic G. Reliability Testing of High-Power Multi-Chip IGBT Modules[J]. Microelectronics Reliability, 2000, 40: 1659-1663.
- [10] Ciappa M. Some Reliability Aspects of IGBT Modules for High-Power Applications[D]. Konstanz: Hartung-Gorre, ETH Zürich, 2001.
- [11] Morozumi A, Yamada K, Miyasaka T. Reliability Design Technology for Power Semiconductor Modules[J]. Fuji Electric Review, 2001, 47(2): 54-58.
- [12] Shammas N Y A. Present problems of power module packaging technology[J]. Microelectronics Reliability, 2003, 43(4): 519-527.
- [13] Siepe D, Bayerer R, Roth R. The Future of Wire Bonding is? Wire Bonding! [C]//Proc. CIPS, 2010: 115-118.

