

功率循环测试中衬底焊接层的可靠性

Thomas Hunger, Reinhold Bayerer (德国)

(英飞凌科技股份有限公司, 瓦尔施泰因)

摘要: 基板与陶瓷衬底之间的焊层寿命通常利用 IGBT 模块的被动加热和冷却 (热循环) 来测试, 但这种试验会引起焊层失效 (分层)。实际应用中, IGBT 和二极管芯片是主动被加热的, 诸如焊线脱落等其它模式的失效也会限制使用寿命, 通常可通过功率循环试验来评估这种应力的影响。本文通过功率循环试验来评估衬底焊层的失效, 利用高循环周次的测试进行有效的衬底焊层热循环试验, 其关键在于功率循环过程中焊层温度的预测。在温度波动不大的条件下, 比较了被动热循环和主动功率循环时对焊接寿命的影响。

关键词: 功率循环试验; 热循环试验; 寿命终止裂纹长度; 温度波动

中图分类号: TN303

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2010)04-0001-04

Reliability of Substrate Solder Joints from Power Cycling Tests

Thomas Hunger, Reinhold Bayerer

(Infineon Technologies AG, Warstein, Germany)

Abstract: The lifetime of the solder joint between base plate and ceramic substrate is usually tested by passively heating and cooling the IGBT module (thermal cycling). This provokes failures (delamination) in that solder layer. However, the IGBT and diode dies are actively heated in the application. Other failure modes (e.g. bonding wires lift off) are addressed and limit the lifetime. This kind of stress is usually tested via power cycling. In the present paper the power cycling test results are evaluated with respect to failures in the substrate solder. Those tests with their high number of cycles are utilized as an effective thermal cycling test for the substrate solder. Key factor is the prediction of the solder temperature during power cycling. A comparison of the solder joint lifetime was carried out between passive thermal cycling and active power cycling at low temperature swings.

Key words: power cycling test; thermal cycling test; EOL(end of life) crack length; temperature swing

0 引言

IGBT 模块在应用时 (如逆变工作) 因半导体芯片产生的开关损耗和通态损耗而承受巨大的热负荷。随着时间的推移, 热负荷将会在模块的机械连接部分 (特别是焊接线及焊点) 引发机械应力, 这是导致焊层裂纹形成和扩展的原因^[1-5]。故障现象之一是热阻增加, 它被视为 IGBT 模块寿命终止 (EOL) 的准据。因此, 必须清楚一定工作条件下 IGBT 模块的使用寿命, 估算时要考虑

利用加速试验获取的寿命曲线中的循环次数^[6]。实际工作特性不同, 产生的失效模式亦可能不同。目前已知, 对于有基板的模块, 长时间的功率循环会导致基板与陶瓷衬底间的焊接处 (即基板焊层) 出现分层现象。加速寿命测试采用热循环试验方式, 周期约为几分钟, 温度变化约为 $\Delta T = 80 \text{ K}$ 。实际应用时, 多数循环的 ΔT 范围相当小, 但循环周期是变化的。

本文介绍并比较了基板焊接层的加速热循环试验 (被动循环试验) 和功率循环试验 (主动循环试验), 并给出了功率循环试验中基板焊层的实验结果。由于主动循环试验周期较短, 因此在合理的时间范围内可实现较多次的循环试验, 尤其当 ΔT 范围较小时。本研究

收稿日期: 2010-06-20

作者简介: Thomas Hunger (1973-), 男, 博士, 项目经理, 主要从事高压 IGBT 模块研究工作。

仅限于采用铜基板和含铅焊料的模块。为了准确地掌握壳温及其在功率循环试验过程中的波动情况,根据散热器特性和环境热传递特性,利用热有限元分析法研究模块中的温度分布情况,由仿真结果可以估算出模块内部温度。本文主要研究结、壳和焊层温度之间的关系,得出的结论是,温度波动越小,使用寿命曲线越长。

1 循环试验

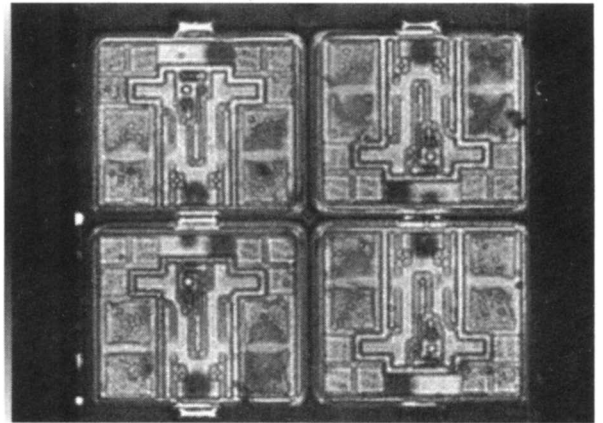
1.1 被动热循环试验

将涂抹了导热膏的IGBT模块安装在一个加热器与散热器集于一体的装置上,进行被动温度波动试验,循环周期仅为几分钟。因此根据外部设置,模块(基板、陶瓷衬底和芯片)有一个恒定的温度。温度波动体现为基板底部温度(T_c)的变化。 ΔT_c 通常设置在60 K至100 K之间。失效标准是热阻提高20%。

1.2 功率循环试验

测试时,IGBT模块安装在散热器上,芯片通电后产生的功率损耗导致芯片发热。根据最高结温和理想的温度波动值,导通时间典型值从几秒钟到几分钟不等。关态期间,模块温度下降,之后重复循环试验。冷却时间取决于散热系统的性能。由于直接加热芯片,因此试验中可快速提升结温(T_j)和壳温(T_c)。利用高效的散热系统,该试验可进行超快速循环,可实现的循环次数远高于被动热循环的次数(即 $N > 10^6$)。

通常,功率循环试验和热循环试验中的寿命终止失效机理是不同的。功率循环试验解决的是焊接线脱落或芯片焊点疲劳的问题。前者会引起正向压降升高,而后者则会导致热阻提高。图1示出基板焊点和芯片表面的超声成像,图1(a)显示开始出现分层(箭头所指位置),图1(b)显示IGBT模块的芯片焊点有严重损害迹象。



(b) 芯片表面

(b) Chip surfaces

图1 超声成像

Fig. 1 Ultrasonic images

功率循环与热循环的主要区别在于其模块内部温度的非一致性,如结温明显高于壳温和焊层内部温度。热传播在整个模块内部形成温度分布,温度的波动与相对于有效芯片的位置有关。整个基板的温度不是恒定的,芯片下方位置的温度最高。基板焊点也是如此,角和边缘位置的温度比芯片下方位置的低。因此,温度波动较小。

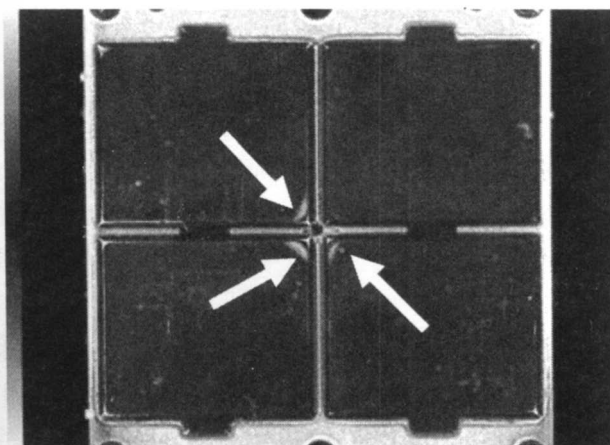
2 功率循环试验中系统焊接的实验结果

在 $\Delta T_j < 100$ K的功率循环试验中,衬底焊接处通常不会表现出明显的疲劳,只在极少数情况下,会在衬底焊接层拐角位置发现开始分层的现象(图1)。然而,在功率循环中,模块寿命终止是由会引起热阻大幅提高和焊接线脱落的芯片焊点受损导致的。衬底焊接层的分层程度不会影响模块的使用寿命,因为衬底焊层疲劳不会引起热阻提高。

3 温度分布和数据评估

功率循环试验时,模块内部的温度并非均匀一致的。可以通过热阻抗公式,计算出模块内部的温度分布。模块内特定区域的热阻抗 z_{th} 既可利用红外热像仪测出,也可通过有限元方法算出^[7-8]。前种方法仅可测出开放式模块的表面温度,而后种方法则还能计算出模块内层温度(如焊层温度)。图2示出当所有IGBT芯片同时通电的情况下IGBT模块内部的静态温度分布,显然,温度分布不均匀,尤其是在芯片位置与衬底边角之间。

有限元计算需要适当地校准散热环境(即散热器的热阻抗性能)。根据红外热像仪测得的阻抗曲线,相应地调节模拟中的导热膏厚度等自由参数,即可做到



(a) 基板焊点

(a) Substrate solder

这一点。

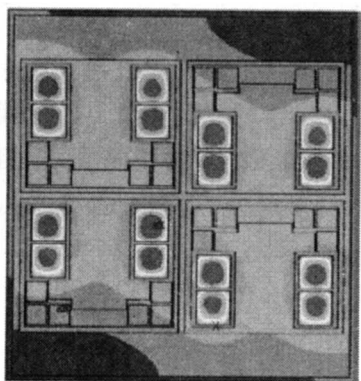


图2 IGBT芯片通电情况下IGBT模块内部温度分布

Fig. 2 Temperature distribution in an IGBT module with powered IGBT dies

利用热阻抗曲线,根据功率循环试验中采用的负载分布,可以计算出模块温度。根据感兴趣区域(ROI)对芯片中阶跃功率脉冲(P_0)的温度响应,计算出 Z_{th} 曲线。

$$Z_{th} = \frac{T_{ROI}(t) - T_{ambient}}{P_0} \quad (1)$$

式中: T_{ROI} ——感兴趣区域温度; $T_{ambient}$ ——环境温度; t ——时间。

Z_{th} 曲线随着负载分布 $P(t)$ 而卷积,直接体现了感兴趣区域的瞬时温度响应:

$$T_{ROI}(t) = \int_{-\infty}^t Z_{th}(t-\tau) \cdot P(\tau) \cdot d\tau \quad (2)$$

式中: Z_{th} ——热阻抗; P ——功耗。

图3示出功率循环试验时监测到的模块内部不同位置的典型温度分布,其中 T_j 为结温、 T_c 为芯片下方的壳温、 T_{corner} 为衬底焊层拐角位置的温度。芯片中的负载(脉冲功率)分布使得所监测的模块内部温度(包括结

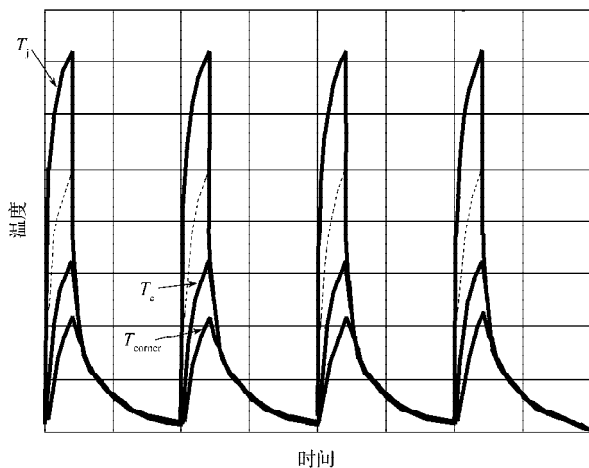


图3 模块内部温度分布

Fig. 3 Temperature profile inside a module

温、壳温和衬底焊层拐角位置温度)升高。焊层拐角位置的温度波动幅度小于芯片位置下方的壳体温度波动幅度,然而焊接裂纹始于拐角位置。

4 延长使用寿命曲线及其讨论

从实验或仿真可以知道衬底焊层分层程度与 R_{th} 提高20%的寿命终止标准的关系^[3-4]。通过将热循环试验中产生的寿命终止裂纹长度 $L_{TC,EOL}$ (或分层区域)与本文研究的功率循环试验中产生的寿命终止裂纹长度 L_{PC} (或分层区域)进行比较,确定换算系数 S 。热循环试验中的使用寿命 $N_{TC,EOL}$ 取决于功率循环试验中的循环次数 N_{PC} 和 S (式(3)),也就是说,如果衬底焊接处的分层已经限制了模块的寿命终止,那么,该模块可以承受5倍的循环次数。

$$S = \frac{L_{PC}}{L_{TC,EOL}} = \frac{N_{PC}}{N_{TC,EOL}} \approx \frac{1}{5} \quad (3)$$

式中: N_{PC} ——功率循环试验中的使用寿命; $N_{TC,EOL}$ ——热循环试验中的使用寿命。

图4示出功率循环试验中采用铜基板模块的寿命曲线,其中◆代表热循环试验原始数据;开放符号代表功率循环试验数据,此时系统未出现焊接分层;▲代表功率循环试验数据,此时已经开始分层;虚线无实际意义,仅为便于看图。可以看出,当温度波动幅度较小时,铜基板模块的寿命曲线延长了。温度波动量指热循环试验中的壳温变化量 ΔT_c 和功率循环试验数据 ΔT_{corner} 。功率循环试验数据采用了焊层拐角位置的温度波动值。

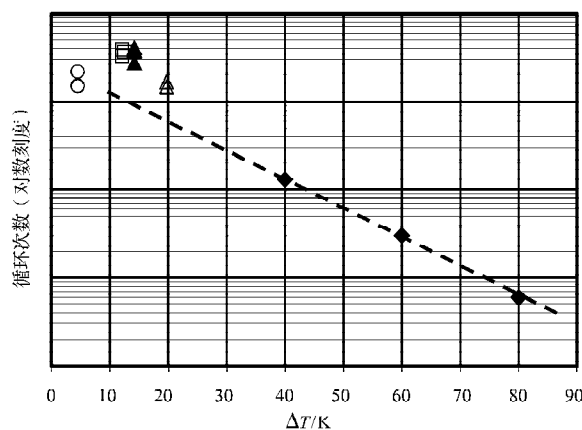


图4 功率循环试验中采用铜基板模块的寿命曲线

Fig. 4 Lifetime curve for module with copper base plate from power cycling

该试验过程需要一些分层现象产生以便“校准”该方法,如果直到功率循环试验结束仍没有分层现象出现,那么就不能确定换算系数。使用寿命被视为下限值,即衬底焊接层位置的“实际”使用寿命更长。

在该试验过程中,当温度波动幅度很小时,可以外

延使用寿命曲线,图4示出了这个结果。包含开放符号的数据集对应于在功率循环试验中达到寿命终止,但没有看到衬底焊接处有分层迹象的模块。因此,这些数据被视为使用寿命下限。只有一个样品的数据集显示已经开始分层(实心三角形)。图4中,这个数据集显示的使用寿命比根据热循环试验数据采用外推法预测的更长。然而,以幂定律为基础的Coffin-Manson关系式更适于描述焊料的使用寿命:

$$N = C_1 \cdot (\Delta T_c)^{C_2} \quad (4)$$

式中: C_1 、 C_2 ——系数; ΔT_c ——壳温变化量。

图5所示为图4中的数据根据幂定律转换后的双对数图,其中◆代表热循环试验原始数据;□,○,△,▲代表图4中在焊接层拐角位置测得的温度变化量 ΔT_{corner} 对应的数据;■,●,▲,△代表随温度 T_c 波动而相应进行移动的数据。请注意所评估的功率循环试验数据中的原始温度波动值是在焊接层拐角位置测量所得。

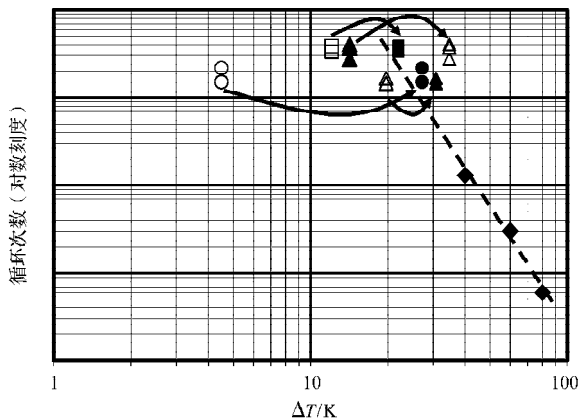


图5 图4中数据的双对数转换

Fig. 5 Data from fig. 4 plotted double logarithmically

根据测得的最热芯片正下方位置的模块壳温偏移,相应数据集发生移位。这个点是数据表中 $R_{\text{th,JC}}$ 和 $Z_{\text{th,JC}}$ 的参考点。参考温度可通过实验或基于 Z_{th} 特性(如负载分布或标注逆变器尺寸等)的热计算获得。

功率循环试验结果表明,温度波动幅度较小时,衬底焊接的性能与根据在温度波动幅度较大时测得的被动热循环数据经幂定律外推法计算出的性能是相一致的。

这种方法的缺陷之一在于确定 ΔT_c 时有误差,这与模块和散热环境的建模有关,虽然这个误差看起来是符合实际的。另一个不足之处在于对寿命终止循环次数进行相互比照。如前文所释,只在少数情况下,功率循环试验中才会发生焊层受损情况,相比于其他试验,实际裂纹长度取决于不同样品各不相同的焊层厚度和其他影响因素。

在讨论加速寿命试验时,仅讨论了 ΔT_c ,未详细讨论温度波动的时间和斜率。

5 结语

本文以带铜基板的IGBT模块为例,研究了在功率循环条件下衬底焊接处的性能。除循环时间之外,功率循环试验与被动热循环试验的一个主要区别在于其温度分布不均匀。利用热阻抗仿真曲线,可以得到模块内部的温度分布,以确定在功率循环试验过程中模块任何部分的温度波动。利用功率循环试验数据,可以估算出衬底焊接层的使用寿命。由实验结果可知,当温度波动幅度较小时,可以利用热循环试验数据、采用幂定律外推法计算出系统焊接层的使用寿命。

参考文献:

- [1] Schüttz T, Berg H, Hierholzer M. Further improvements in the reliability of IGBT modules[C]//IAS '98, St. Louis, Ind. Appl. Conf., Proc. IEEE. 1998: 1022-1025.
- [2] Herrmann T. Power cycling induced failure mechanisms in solder layers[C]//Proc. EPE. 2007.
- [3] Guth K, Mahnke P. Improving the thermal reliability of large area solder joints in IGBT power modules[C]//Proc. CIPS. 2006.
- [4] Sommer J P. Solder fatigue at high-power IGBT modules[C]//Proc. CIPS. 2006.
- [5] Bayerer R. Model for power cycling lifetime of IGBT modules - various factors influencing lifetime[C]//ETG-Fachbericht Band 111, Proc. CIPS. 2008.
- [6] Thoben M. From vehicle drive cycle to reliability testing of power modules for hybrid vehicle inverter[C]//Proc. PCIM Europe. 2008: 651-656.
- [7] Hunger T, Schilling O. Numerical investigation on thermal crosstalk of silicon dies in high voltage IGBT modules[C]//Proc. PCIM Europe. 2008: 218-223.
- [8] Brekel W. Time resolved in Situ Tvj measurements of 6.5 kV IGBTs during inverter operation[C]//Proc. PCIM Europe, VDE VERLAG GMBH Berlin · Offenbach. 2009: 808-813.