

通过功率循环测试量化大功率多芯片IGBT模组热流路径中的分层、开裂区域

王刚 Mentor机械分析 2022-03-29 10:27

最近很多客户询问如何将功率循环测试的结果与IGBT模组中焊料层的分层、开裂的老化降级结合起来。下来以一个案例为例，介绍如何通过功率循环测试量化大功率多芯片IGBT模组热流路径中的分层、开裂区域。

一、概要：

热传导路径的老化降级是功率半导体封装最常见的失效机理之一。通常，焊料疲劳的发生是由于构成热流路径不同的材料之间的热膨胀系数不匹配而导致界面交界处的热-机械应力，并导致分层、开裂。使用瞬态热测试技术进行瞬态热测试是功率半导体封装中热传导路径的常用表征方法。

瞬态热测试中的热流路径可以用等效的热阻-热容Cauer网络模型来表示。瞬态热测试使用热阻抗曲线，并通过“结构函数”，作为非破坏性评估技术来检测热传导路径中的结构缺陷。

二、实验过程：

图1显示的是传统的1200V/200A IGBT功率模块。此模块为一个三相IGBT模块，由三个DBC组成，并安装在铜基板baseplate上。每个DBC板上有两个IGBT芯片和两个独立Diode芯片。

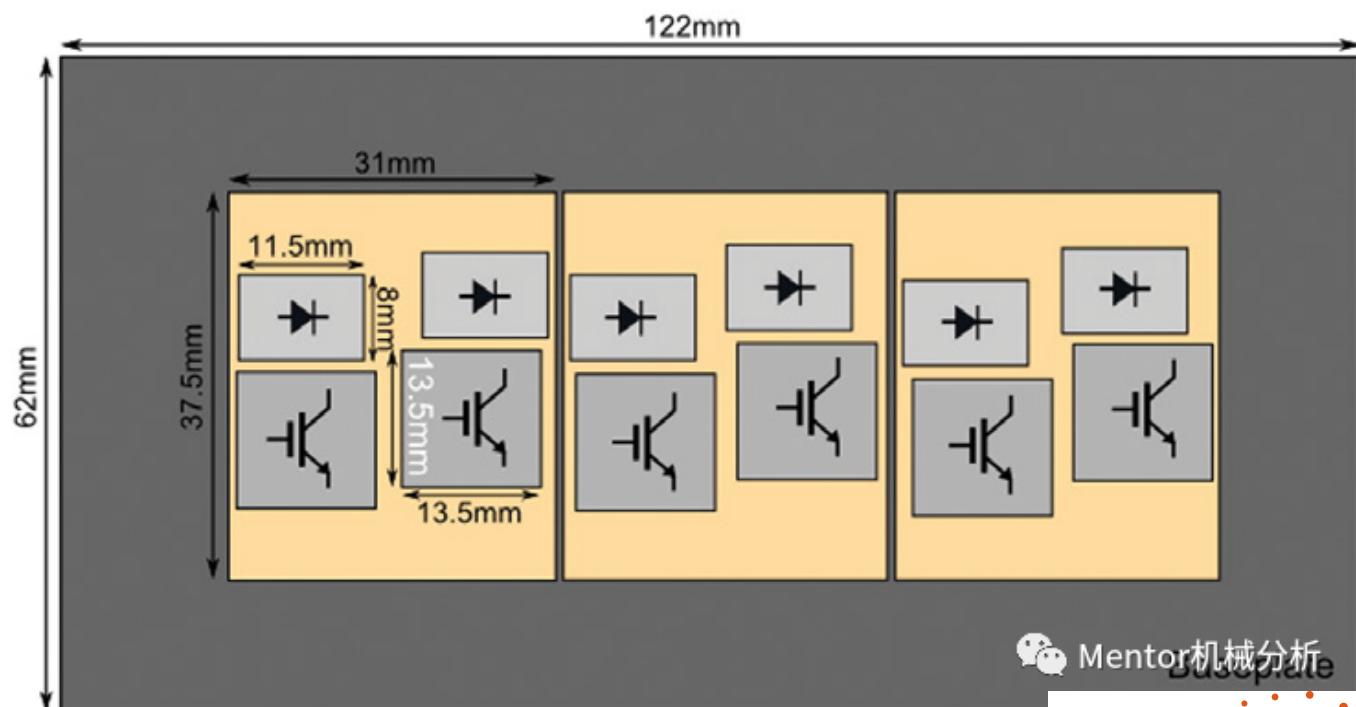


图1：被测IGBT模块的布局

坤道 SIMUCAD

在实验中，对此传统的1200V/200A IGBT功率模块施加了主动功率循环测试，DBC和baseplate之间的焊料层发生了老化降级。通过“结构函数”获得的结壳热阻 R_{thjc} 和分层开裂

面积之间的关系，与通过扫描声学显微镜(SAM)估算的开裂和未连接区域进行了对比。SAM成像在功率循环测试的多个阶段定期进行，以观察焊料层的逐渐老化降级。

将被测IGBT模块安装在冷板上，在冷板和被测IGBT模块之间放置一层25 μ m厚的Kapton热绝缘膜，用作冷板和被测IGBT模块的铜基板baseplate之间的界面材料。使用这层热绝缘膜的目的是增加被测器件外壳到环境的热阻，以便在DBC-外壳界面处实现温度波动，从而与其它失效机制相比，可以加速DBC-baseplate之间焊料层的老化降级。

被测IGBT模块中所有的IGBT器件均采用栅极-发射极电压 $V_{ge} = 15V$ 进行偏置，以使加热电流 I_c 以及测试电流 I_m 在模块的每个IGBT上流动，使其发热。

在 $I_m = 200mA$ 的恒定测试电流下的校准曲线 $T_j = f(V_{ce})$ ，用于计算结温 T_j 。功率循环测试加热电流由Siemens Simcenter POWERTESTER进行调节，以保持恒定的 $\Delta T_j = 120^\circ C$ 。在功率循环测试过程中，冷却水温保持在 $20^\circ C$ 。根据 V_{ce} 的测量电压值进行估算， $T_{jmax} = 140^\circ C$ ， $T_{jmin} = 20^\circ C$ 。 T_{on} 加热时间和 T_{off} 冷却时间分别固定为50秒和60秒。这样，在被测IGBT模块的壳上实现了 $T_{max} = 90^\circ C$ 、 $T_{min} = 20^\circ C$ 、 $\Delta T = 90 - 20 = 70^\circ C$ 的温度变化。

功率循环测试以初始的加热电流 $I_c = 236A$ 开始，此时功耗 $PD = 704W$ 。由于焊料层疲劳导致功率循环测试期间热阻增加，调节加热电流以保持 $\Delta T_j = 120^\circ C$ 为恒定。在这些条件下，引线键合剥离失效机理不是主导失效机理，并且在观察到任何引线键合剥离之前，DBC-baseplate之间的焊料层会老化降级。

在Siemens Simcenter POWERTESTER上进行设置，每1000次功率循环后定期暂停功率循环测试。此时通过Siemens Simcenter POWERTESTER对被测IGBT模块在“原位”进行瞬态热测试，在功率循环测试期间总共进行了17次瞬态热测试。

在功率循环测试中，定期使用SAM对被测IGBT模块进行扫描。扫描声学显微镜(SAM)是一种非破坏性技术，它能够对被测IGBT模块的内部特征进行成像，并可以检测到亚微米厚度的不连续性和空隙。它从反射的超声波回波中创建二维灰度图像。任何内部层的缺陷都会导致结构不连续，并阻止超声波信号穿透缺陷区域下方的层。因此，DBC-baseplate焊料层中的缺陷会导致从芯片级别拍摄的C-scan扫描图像中出现如图2显示的黑色阴影。

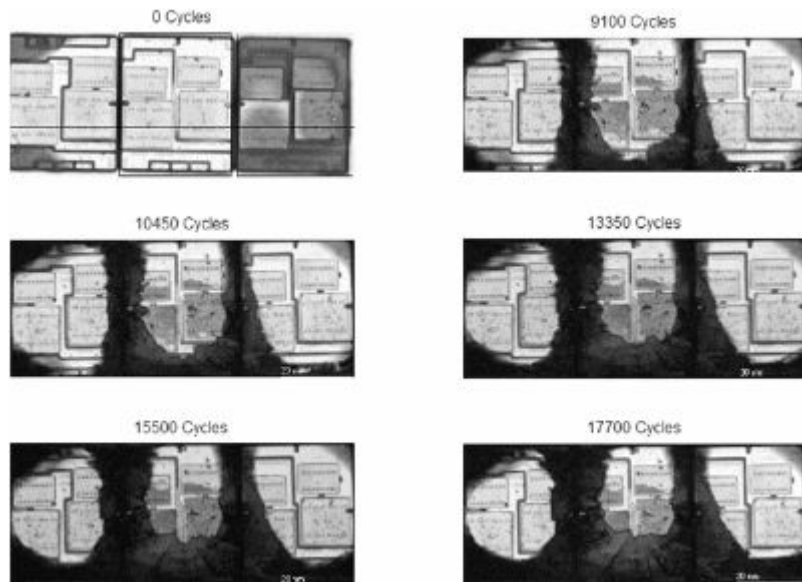


图2：功率循环测试期间在不同循环次数下扫描声学显微镜(SAM)图像

通过这种方式，C-scan扫描图像用于获得粘结区域和不连续区域之间的明显边界。然而，被测IGBT模块结构内缺陷的确切位置从SAM图像中并不清楚，因此，相关的金相学横截面分析是必要的。

功率循环测试在17700次循环后终止，此时结至环境的总热阻 R_{thja} 比其原始值增加了14%。实验后经确认，模块中所有的IGBT器件仍可在电气上正常工作。在最后的SAM观察之后，准备金相学横截面分析并在光学显微镜下检查，以确认老化降级的机理。

三、实验结果分析：

如图2所示，在功率循环测试之前，被测IGBT模块在其“原始”状态下成像，在该阶段，封装内部未观察到分层、开裂或空隙。SAM成像分别在9100次、10450次、13350次和15500次循环时进行并中断功率循环测试。在17700次循环后，测试终止并进行最终扫描。粘结附着面积的百分比计算为：粘结附着面积(%)=白色像素数/像素总数，此结果由扫描声学显微镜(SAM)提供。

图3显示了在循环测试测试期间，不同循环次数下焊料层的估计粘结附着面积。在初始第0次循环时，粘结附着面积估计为93%，这是因为SAM处理算法将不同DBC板之间以及铜迹线与引线键合足迹之间的分隔线识别为黑色像素即分层、开裂区域。但是，这并不会影响观察到的趋势，因为这些黑色像素在其余图像中也是持续存在。随着功率循环测试次数的增加，分层、开裂会通过焊料层传播，导致粘结附着面积逐渐减小，直到在17700次循环后达到43%的附着面积。

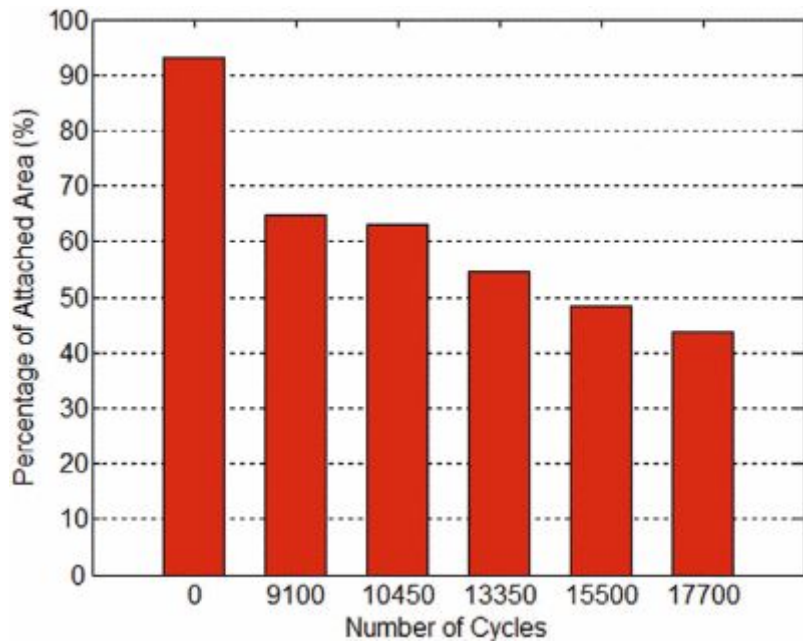


图3：通过SAM图像估算循环测试期间焊料层的粘结附着面积

图4显示了随着功率循环次数的增加，“结构函数”曲线会发生变化。这种变化表现为热阻增加，因为“结构函数”曲线在X轴上随着循环测试的增加而向右移动。变化始于DBC-baseplate之间的界面，在该界面可以发现在X轴上的扩展。然而，仅从该图很难得出确切的结论，即在焊料层界面区域的哪个位置发生了分层、开裂。

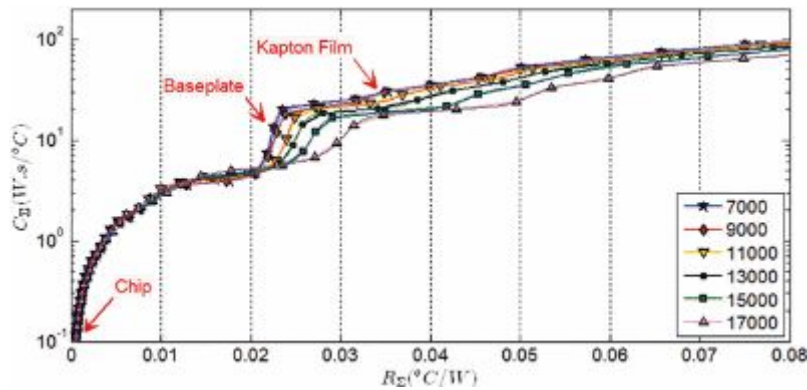
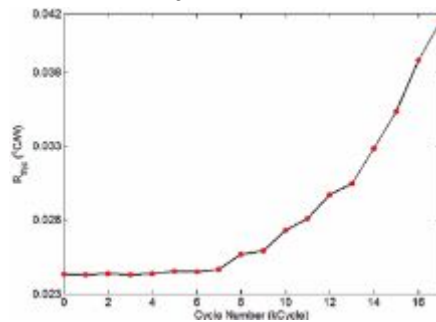


图4：积分结构函数曲线显示随着功率循环测试的进行热阻值的增加

结-壳热阻 R_{thjc} 可以在“结构函数”曲线上从baseplate区域末端和热绝缘膜Kapton薄膜区域开始之前的部分读出。图5显示了 R_{thjc} 作为循环次数的函数。可以看出， R_{thjc} 基本保持不变，直到8000次循环，从这一点开始， R_{thjc} 逐渐增加，直到测试结束。



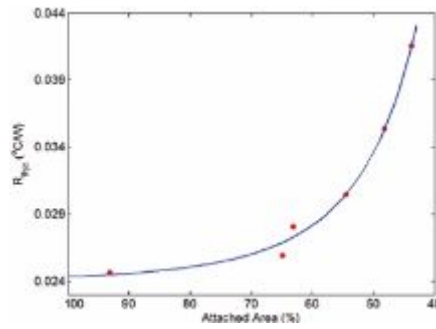


图5：在功率循环测试期间，由于焊料疲劳而导致的结-壳热阻 R_{thjc} 的变化以及它与焊料层的横截面粘结附着面积的关系

R_{thjc} 的总增量大约是其原始值的70%，估计为 $0.024^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。该增量是DBC-baseplate界面处焊料层分层、开裂的结果。图6显示的金相学横截面分析也证实了这一点。

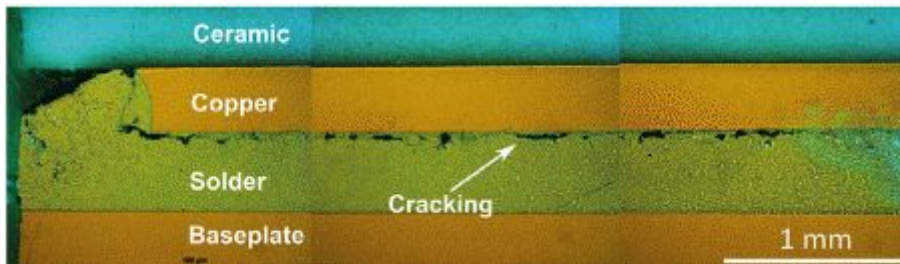


图6：金相学横截面分析图像显示了DBC-baseplate界面处功率循环导致的分层、开裂

图5还显示了在7000次、9000次、11000次、15000次和17000次循环时测量的 R_{thjc} 值，并将其绘制为从图2的SAM图像估计的粘结附着面积百分比的函数。可以看出，随着粘结附着面积的减小，热阻迅速增加。此外，从图5中还可以观察到“结构函数”曲线对结构缺陷的敏感性取决于半导体芯片相对于缺陷位置的位置。也就是说，它对位于芯片正下方的缺陷具有较高的敏感性，使得该缺陷对芯片有直接的热影响，而远离芯片的缺陷会导致“结构函数”曲线对该缺陷的敏感性较低。这就是为什么直到35%的DBC-外壳焊料层破裂时“结构函数”曲线才会发生变化的原因。焊料层的开裂始于DBC的角落，这里是热-机械应力最集中的地方。最初这对从半导体芯片流向散热器的热量几乎没有影响。

随着裂纹向DBC板的中心方向扩展，热流受阻，只有这样“结构函数”曲线才开始表明存在缺陷。图7显示了7000次和15000次循环之间的微分结构函数曲线。该图中的每个峰表示热流路径上具有不同横截面积的材料层。峰值幅度的减小表明与该峰值相关的材料层的散热横截面积减小。峰位置沿X轴的偏移表明该层的热阻发生了变化。因此，可以识别各个层的热阻。此外，如果材料特性已知，则可以确定厚度。最显著的峰是峰3，它与baseplate层相关。

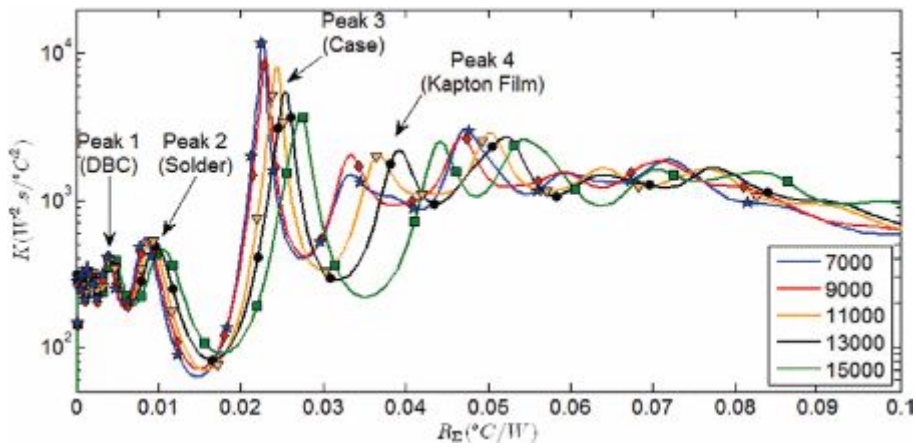


图7：微分结构函数曲线，不同的峰指示着散热路径上不同的材料层

显示的其它峰与热量流过的不同材料有关。最显著的变化可以在峰2和3的幅度中看到，它们正在下降。另一方面，峰1和峰4保持几乎恒定的幅度。这种幅度的减小意味着在DBC-baseplate之间的界面处的焊料层的散热横截面积减小。这伴随着焊料层热阻的增加，由峰2和峰3的位置沿X轴向右的正向移动表示。

微分结构函数曲线的峰3的K值可以绘制为循环次数的函数，如图8所示。

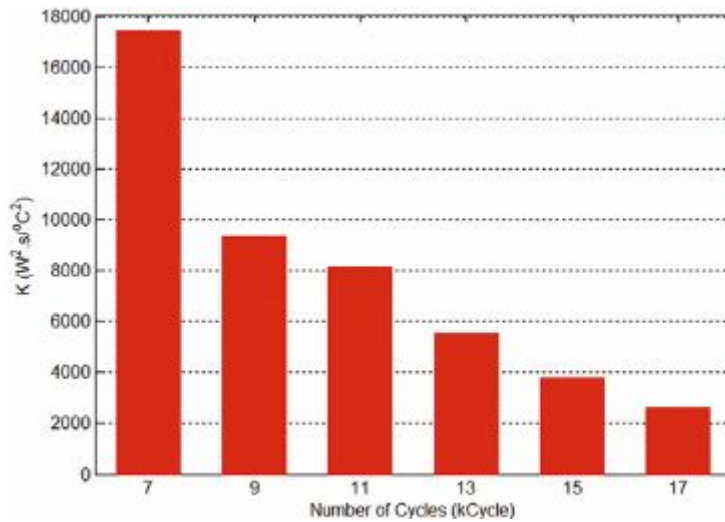


图8：微分结构函数曲线上峰3表示baseplate区域的K值在功率循环测试中显示出稳定下降，表明散热横截面积减小

K值随着功率循环测试次数的增加而明显下降，这意味着散热横截面积的减小。为了揭示这两个量之间的关系，将之前从SAM图像估计的横截面积与微分结构函数给出的K值进行比较，并通过图9显示。其中可以看出K值与横截面积的平方呈线性相关。

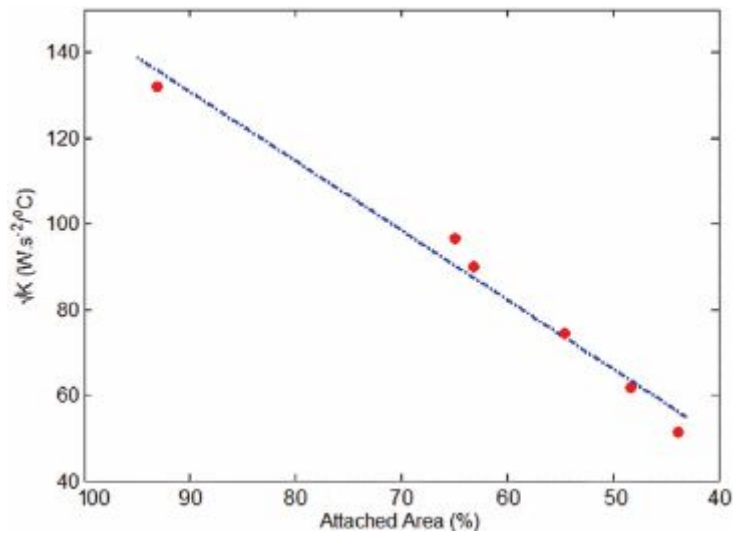


图9: K值由微分结构函数曲线的baseplate区域的数值给出, 并与焊料层横截面积的平方成线性相关

被测IGBT模块的每个IGBT器件在17700次功率循环测试后仍能正常工作, 但是SAM图像显示了各个IGBT器件下方不同程度的不连续性。因此, 增加了一项实验, 以检查除了被测IGBT模块整体之外, 是否可以在单个IGBT器件的“结构函数”中观察到这种热流的不均匀性。在这项实验研究中, 导热硅脂被用作界面材料, 而不是在功率循环测试中使用的热绝缘膜Kapton薄膜。在瞬态热测试中, 测试被测IGBT模块中每个单独IGBT器件的热阻抗并计算“结构函数”曲线。

每个单独的IGBT器件下的连接面积是根据SAM图像在17700次循环时估算的, 如图10所示。IGBT器件的编号为1到6。

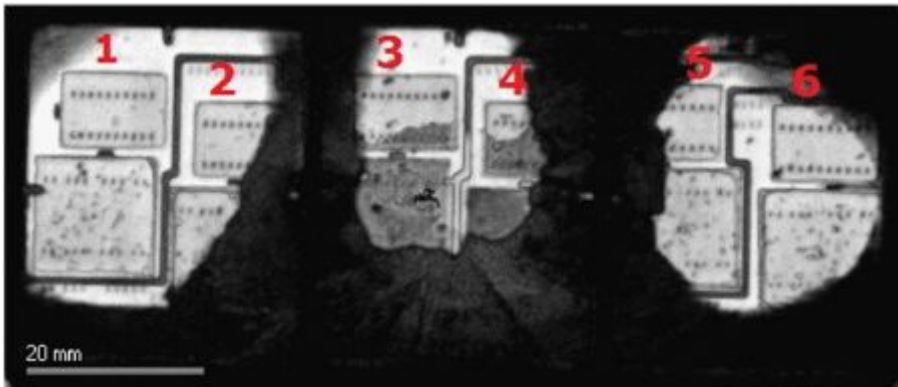
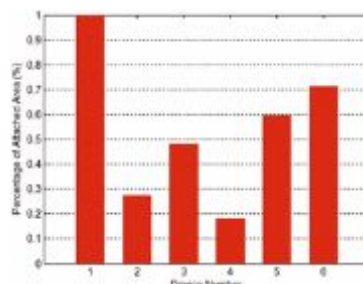


图10: 功率循环17700次后的SAM图像显示了6个IGBT器件下不同程度的分层、开裂

每个IGBT器件下的估计粘结附着面积的百分比如图11所示, 从最低到最高的值是IGBT4, 其次是IGBT2, 然后是IGBT3、IGBT5、IGBT6, 最后是IGBT1。图11还显示了单个IGBT器件的积分结构函数曲线。



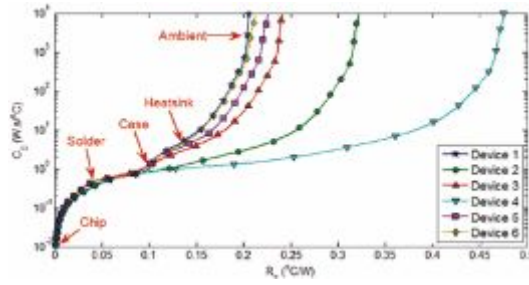


图11：17700次循环后每个IGBT器件的局部粘结附着面积百分比和每个IGBT器件的积分结构函数曲线

由于每个IGBT器件下方DBC-baseplate界面区域的不连续程度不同，曲线之间存在较大差异。在与IGBT1和IGBT6相关的曲线上，最容易识别不同的热层，因为它们受焊料层疲劳的影响最小。随着其它器件中局部分层、开裂程度的增加，结构中不同材料层的特征开始消失。IGBT4受分层、开裂影响最严重，以至无法区分其不同材料层的特征。因此，结-环境热阻 R_{thja} 可以直接与单个IGBT器件下方的连接面积百分比进行比较。

图12显示了各个IGBT器件的 R_{thja} 与每个IGBT器件下方焊料的粘结附着面积的关系。与图5所示的结果类似，可以看出 R_{thja} 可以与粘结附着区域相关联。

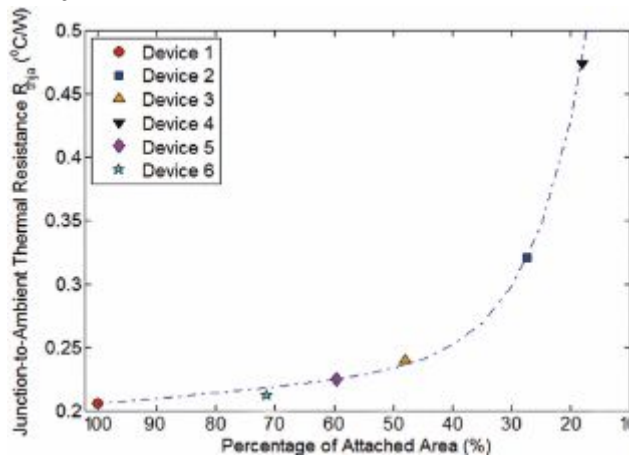


图12：单个IGBT器件在17700次循环后的结-环境热阻 R_{thja} ，是每个IGBT器件下方连接面积的函数

如果生成并绘制K值与连接面积百分比的平方的关系，图13再次显示了一个清晰的线性相关性，可以推断出K值是每个单独IGBT器件的连接面积百分比的平方的函数。

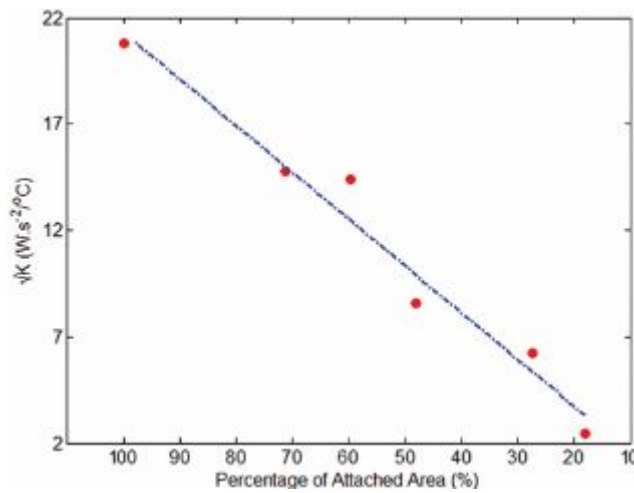


图13：K值作为各个IGBT器件的部分连接面积的平方的函数

四、实验结论：

使用Siemens Simcenter POWERTESTER获得的“结构函数”曲线作为非破坏性测试工具进行了评估，用于检查重复功率循环测试下大功率多芯片IGBT模块中热流路径的完整性。对具有6个IGBT器件的1200V/200A IGBT模块，进行功率循环测试以考察DBC-baseplate界面处的焊料层的焊接疲劳失效机理。

在功率循环测试期间，定期进行瞬态热测试和SAM成像。根据该数据，计算“结构函数”并估算焊料层中的分层、开裂面积。通过横截面进行的失效分析确定了DBC-baseplate之间焊料层的不连续位置。此次实验发现，根据“结构函数”曲线估算的结-壳热阻 R_{thjc} 的变化与根据SAM图像计算的焊料层剩余粘结附着面积之间存在明显的相关性。结果表明，从微分结构函数获得的K值与从SAM图像估计的粘结附着面积百分比的平方线性相关。从模块中各个IGBT器件的瞬态热测试的局部测量而计算的“结构函数”曲线也发现了类似的结果。

因此，Siemens Simcenter POWERTESTER及其“结构函数”曲线，可用于以非破坏性方式评估功率模块和单个器件特定层的退化。Siemens Simcenter POWERTESTER可以用作主要检查工具，在决定是否需要进一步但可能耗时的替代方案，例如：SAM或破坏性分析之前，快速测试功率半导体模块中热流路径的完整性。