

# 用于扩展最高结温的先进功率模块的可靠性

## Reliability of Advanced Power Modules for Extended Maximum Junction Temperatures

Uwe Scheuermann

SemikronElektronik GmbH & Co. KG, Nuremberg, Germany

**摘要:** 在电力电子技术的早期, 使用寿命的评估仅限于最大负载条件和宽松的裕量。今天, 通过对反映负载和冷却系统动态特性的专用任务配置进行评估, 来估计电力电子系统的使用寿命。这种方法提高了预测质量, 但它需要更好且更精细的使用寿命模型。本文将介绍如何推导先进功率模块的使用寿命模型。

**关键词:** 先进功率模块 SKiM63 使用寿命模型

**Abstract:** In the early stage of power electronics technology, evaluation of service life was limited to the condition of maximum load and ample margin. Today, it is evaluated through dedicated-task configuration reflecting load and dynamic performance of cooling system, which improves the quality of prediction. However, such a method needs a better and finer service life model. This paper will tell how to deduce the service life model of advanced power module.

**Key words:** Advanced power module, SKiM63, Service life model

[中图分类号] TN86 [文献标识码] A 文章编号: 1561-0349 (2015) 03-0042-04

## 1 前言

在本世纪初, 对功率半导体拓展最高结温至 150°C 以上的需求得到了越来越多的关注, 这主要是由 3 大因素驱动: 混合动力电动汽车的高冷却液温度、宽带隙器件运行在更高温度下的潜力以及硅器件在高达 200°C 结温下运行时的增强电流能力。这需要显著地增加组件的使用寿命, 因为组件必须在扩展结温下满足相同的使用寿命期望以被应用接受。作为一个经验法则, 根据确切的运行条件和所采用的寿命模型, 最高结温每升高 25°C 需要使用寿命增加 5 倍, 因而对于 200°C 的最高结温来说, 使用寿命需要增加 25 倍。

过去 10 年的技术发展, 开发出了具有达到这一目标潜力的改进互连技术。银扩散烧结和瞬态液相扩散焊, 是取代传统焊料焊接芯片的候选技术。与传统铝绑定线相比, 铜绑定线或者铝包铜绑定线正显著增强顶面芯片触点的使用寿命。

当这种改进的技术随着首次使用寿命测试结果一起被介绍来证明其潜力时, 使用寿命模型一致性的要求被提出, 以评估对基于任务配置的具体应用的优势。然而, 产生实验数据以建立一个新的用于改进技术的使用寿命模型, 需要一个

来自可控的批量生产的测试对象和多年的寿命测试。

## 2 SKiM63 模块简介

下面的讨论将提出一个用于名为 SKiM63 先进功率模块的功率循环使用寿命模型。此模块于 2008 年推向市场, 是 100% 的无焊接设计<sup>[1]</sup>。硅芯片通过银扩散烧结于 DBC 基板上, 从而消除了焊料疲劳。芯片的顶层连接通过 300µm 的带改进线弧的铝绑定线连接。重型铝绑定线上的机械疲劳试验已经表明增加的长宽比会带来使用寿命的增加, 长宽比是绑定线弧高度与绑定线焊脚之间距离的比率<sup>[2]</sup>。然而, 这种改进的潜力会受到经典模块设计中焊料疲劳的限制<sup>[3]</sup>。

SKiM63 模块的设计是基于压接技术, 因此不包含底板。这一特性, 通过消除陶瓷基板与底板之间的应力改善了温度循环能力。在双试验箱中进行的 -40°C ~ 125°C 温度循环试验, 已证实了该模块具有超过 1000 个周期的循环能力<sup>[4]</sup>。无底板设计, 也消除了基板和底板之间在有源功率循环期间的潜在疲劳。负载的连接以母排的形式采用多点压接, 同时在基板和散热器之间建立电气连接和热连接。控制信号和辅助信号通过弹簧连接

发送至基板。SKiM63 的分解图如图 1 所示。

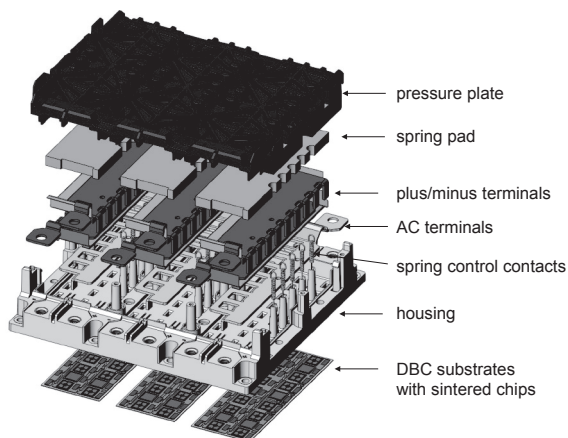


图 1 SKiM63 模块架构的分解图

### 3 SKiM63 模块使用寿命模型建立

SKiM63 模块被选出为带有顶部铝绑定线连接的烧结器件建立第一个实证的功率循环寿命的模型。由于完全消除了焊锡疲劳，只有出现了绑定线根部龟裂和绑定线脱离才视为故障模式。对于一个一致的使用寿命模型，必须调查功率循环试验的所有重要参数。参数的变化可以模拟它们在实际应用中対使用寿命的影响。

从首个使用寿命模型可知，在功率循环期间，温度摆动的幅度对组件寿命有显著的影响。然而，器件触点的退化会影响热阻和/或电阻，从而可能导致测试过程中温度摆动增大。因此，控制策略对评价测试结果来说是非常重要的<sup>[5]</sup>。一些作者提出控制试验条件，以保持恒定的损耗或甚至恒定的温度摆动。由于对大多数应用来说，这些控制策略是不相关的，这里所展现的所有功率循环试验，是在恒定电流脉冲及恒定脉冲宽度  $t_{on}$  和暂停宽度  $t_{off}$  条件下进行的。温度摆动的特征值，总是在平稳热条件达到后在试验开始阶段获得。在功率循环试验程序中，温度摆动  $\Delta T_j$  在 64K 和 113K 之间是变化的，通过实验观察到的无故障周期数  $n_f$  在 31000 和 770 万之间（图 2）。

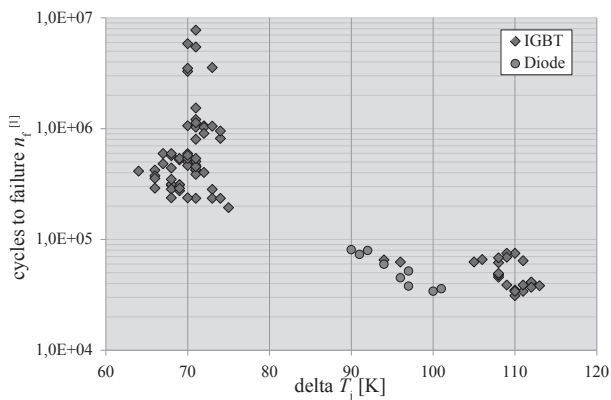


图 2 无故障周期数  $n_f$  与温度摆动之间的关系

平均结温  $T_{jm} = T_{j,min} + \Delta T_j / 2$  在 32.5°C 和 122°C 之间变化，来检查 Arrhenius 定律的影响（图 3）。应当指出，也在 0°C 以下的最低结温进行了一些测试，以涵盖冷启动情况下的效果。铝绑定线的长宽比选择在 0.19 和 0.42 之间，以分析绑定线尺寸优化的潜力（图 4）。应当强调的是，SKiM63 模块的设计参数是长宽比为 0.31。图 5 中标示了范围在 70ms ~ 63s 之间的功率脉冲宽度  $t_{on}$  的范围。幅度近 3 个数量级的变化，显示了本次检查对此参数的特别关注。

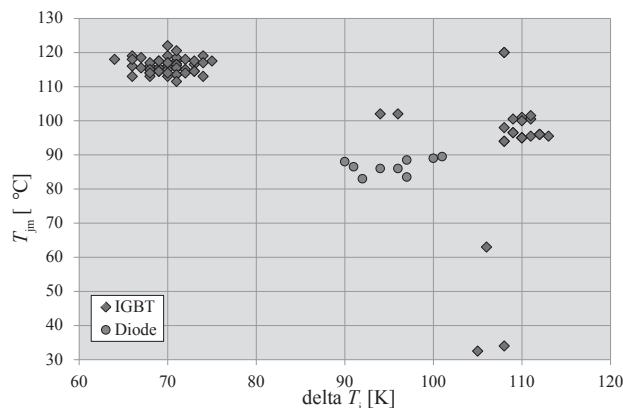


图 3 平均结温与温度摆动之间的关系

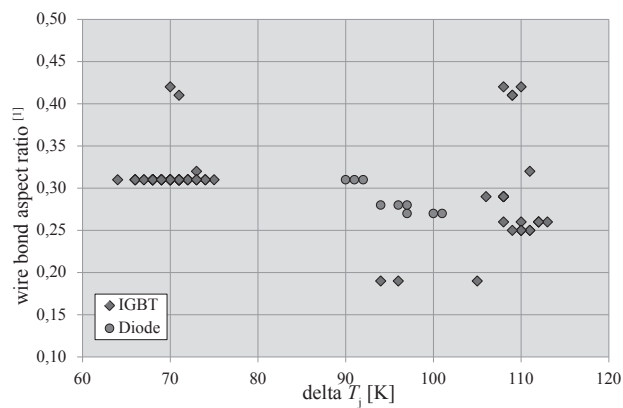


图 4 绑定线长宽比与温度摆动之间的关系

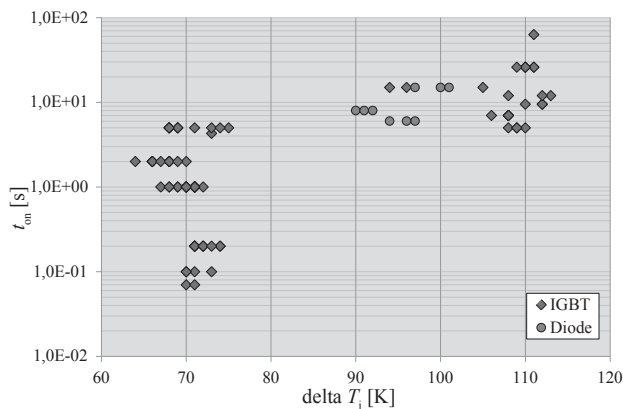


图 5 电源脉冲宽度  $t_{on}$  与温度摆动之间的关系

共计 97 个功率循环试验的结果被用作推导 SKiM63 模块使用寿命模型的数据库，其中 88 项测试在 IGBT 上进行，剩余 9 项测试对二极管上进行（图 2- 图 5 蓝色圆圈所示）。收集这些数据库的测试时间长达 5 年。

使用寿命模型的一般形式是基于众所周知的 LESIT 模型<sup>[6]</sup>，该模型以基本缩放因子  $A$ 、反映温度波动  $\Delta T_j$  影响的 Coffin-Manson 定律和反映平均结温  $T_{jm}$  影响的 Arrhenius 定律来决定无故障周期数  $n_f$ 。两个附加的新因素被添加到模型中，以考虑绑定线长宽比  $ar$  和电源脉冲持续时间  $t_{on}$  的影响。早期研究表明，较高的绑定线弧的优点是更小的温度摆动，从而使该参数的指数被认为是温度摆动的线性函数。功率脉冲宽度  $t_{on}$  的影响由一个函数来描述，随脉冲宽度增加而趋近于一个渐近值，但对于短的（ $\sim 1s$ ）和非常短（ $\sim 0.1s$ ）的脉冲宽度，则体现为周期数量的越来越大。

最后，增加了一个因素，以考虑 IGBT 和二极管测试之间所发现的差异。正如 Bayerer 等人在 CIPS2008 模型已经报告的那样<sup>[7]</sup>，器件的电压等级对功率循环使用寿命会产生影响。这实际上是归因于用于不同电压等级的硅器件的厚度。在实验数据库中，器件为厚度  $120\mu m$  的 1200V 英飞凌 IGBT 与厚度为  $260\mu m$  的 1200V CAL 二极管一起使用。根据 CIPS2008 模型，器件厚度从  $120\mu m$  增加到  $260\mu m$  将导致寿命减少至原先的 59%。由实验确定的约为 0.62 的二极管因子非常符合这一预测。但是，由于测试数据库中没有考虑器件厚度的进一步变化，所以只在二极管测试中应用了简单的缩放因子。

$$n_f(\Delta T_j, T_{jm}, ar, t_{on}) = A \cdot \Delta T_j^\alpha \cdot ar^{\beta_1 \times \Delta T_j + \beta_0} \cdot \left( \frac{C + t_{on}^\gamma}{C + 1} \right) \cdot \exp\left( \frac{E_a}{k_B \cdot T_{jm}} \right) \cdot f_{Diode}$$

#### 4 SKiM63 模块寿命实验

SKiM63 使用寿命模型的系数通过实验测试数据集进行最小二乘拟合得到，结果如表 1 所示。图 6 给出了实验结果和模型预测的对比。图 6 中，SKiM63 使用寿命模型对每个测试参数组的预测按无故障周期数递增来排序，并与实验结果一起显示。正如对最小二乘拟合过程所预期的那样，有些实验结果比预测寿命高，有些比预测寿命低。因此，最终的 SKiM63 使用寿命模型增加了一个附加的裕量因子 0.8。正如文献 [8] 中所详细讨论的那样，该裕量因子代表 15% 的模块失效率或 85% 的存活率。

图 7 中显示了 SKiM63 特征寿命曲线。结合 0.8 的裕量因子和 0.31 的绑定线长宽比，无故障周期数  $n_f$  被表示为不同功率脉冲宽度  $t_{on}$  下温度波动  $\Delta T_j$  的函数。

现在这种新寿命模型可以为专用任务配置计算估计寿命。因此，有必要在已测试参数变化区间之外，推断更小温度摆动下的使用寿命曲线。这对于功率模块来说是个普遍的问题，

因为电力电子应用都要求超过 20 年的使用寿命。我们必须了解，这样的外推不能通过实验来验证。即使今天为这样的参数组合开始进行一项功率循环测试，20 年后得到的测试结果就只能被当作历史了，因为那个时候可能已经无法得到了这些功率器件了。经验模型的这种一般限制只能由基于物理学的疲劳模型来解决，这种疲劳模型可被用来验证应力减少下寿命的相对延长。

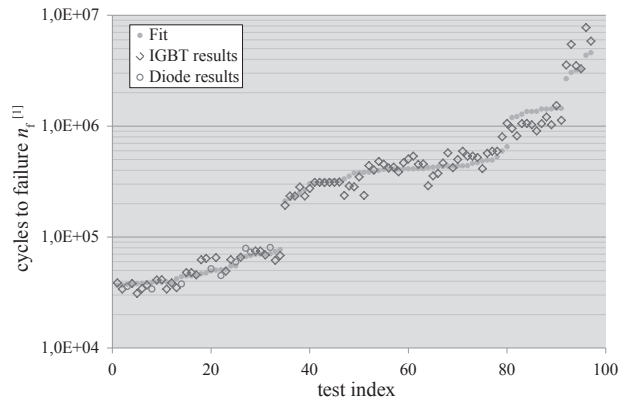


图 6 模型预测和功率循环实验结果的比较

表 1 SKiM63 寿命模型参数

SKiM63 功率循环寿命模型		
参数	值	实验数据范围
$A$	3.4368E14	
$\alpha$	-4.923	$64K \leq \Delta T_j \leq 113K$
$\beta_1$	-9.012E-3	$0.19 \leq ar \leq 0.42$
$\beta_0$	1.942	
$C$	1.434	$0.07s \leq t_{on} \leq 63s$
$\gamma$	-1.208	
$E_a [eV]$	0.06606	$32.5^\circ C \leq T_{jm} \leq 122^\circ C$
$f_{diode}$	0.6204	

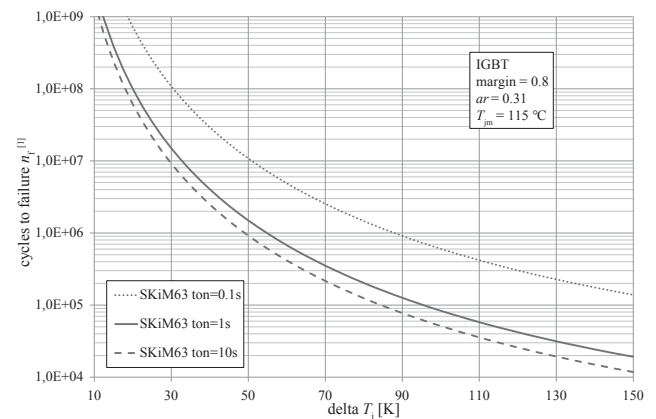


图 7 不同负载脉冲宽度下，裕量因子为 0.8 的 SKiM63 模块寿命曲线与温度摆动之间的关系

从图 7 可以估算平均结温为  $115^\circ C$  时，SKiM63 模块在  $110K$  的温度摆动下的使用寿命，即温度在  $60^\circ C \sim 170^\circ C$  之间

的摆动。对于 1s 的功率脉冲宽度，我们得到  $5.8 \times 10^4$  次的无故障周期，对于 10s 的功率脉冲宽度，我们仍然可以期待  $3.6 \times 10^4$  次的无故障周期。对于采用铜底板、焊接芯片和未经优化铝绑定线的经典工业模块，无故障周期预计为  $3.5 \times 10^3$ 。该比较表明，SKiM63 模块适用于高达 175℃ 的结温。

## 5 结语

对于最高结温增加至 200℃，芯片顶侧连接的进一步的改进是必需的。铜绑定线或铝包铜绑定线，烧结铜片连接是潜在的候选项，这些技术已经在首次演示试验中证明了自己的潜力。不过，今天还没有采用这些技术的系列产品。这将需要几年的时间来进行功率循环测试，为最高结温达 200℃ 的功率模块建立一个一致的使用寿命模型。

### 参考文献

- [1] U.Scheuermann, P.Beckedahl: The Road to the Next Generation Power Module – 100% Solder Free Design, Proc. CIPS 2008, Nuremberg, ETG-Fachbericht111, 111-120.
- [2] S.Ramminger, N.Seliger, G.Wachutka: Reliability Model for Al Wire Bonds Subjected to Heel Crack Failures, Microelectronics Reliability 40 (2000), 1521-1525.
- [3] U.Scheuermann, R.Schmidt: Impact of Solder Fatigue on Module Lifetime in Power Cycling Tests, Proc. EPE 2011.
- [4] U.Scheuermann: Reliability challenges of automotive power electronics, Microelectronics Reliability 49 (2009), 1319-1325.
- [5] U.Scheuermann, S.Schuler: Power cycling results for different control strategies, Microelectronics Reliability 50 (2010), 1203-1209.
- [6] M.Held, P.Jacob, G.Nicoletti, P.Scacco, M.H.Poeh: Fast Power Cycling Test for IGBT Modules in Traction Application, Proc. Power Conversion and Drive Systems 1997, 425-430.
- [7] R.Bayerer, T.Herrmann, T.Licht, J.Lutz, M.Feller: Model for Power Cycling lifetime of IGBT Modules – various factors influencing lifetime, Proc. CIPS 2008, ETG-Fachbericht 111, 37-42.
- [8] U.Scheuermann, R.Schmidt: A New Lifetime Model for Advanced Power Modules with Sintered Chips and Optimized Al Wire Bonds, Proc. PCIM Europe 2013, 810-817.

(上接第 25 页)

active bridge DC-to-DC converter[C]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992: 1294-1301

- [7] 戴钰, 丘东元, 张波. 基于 Matlab 的移相全桥变换器仿真实验平台设计 [J]. 实验技术与管理, 2011, 28(5): 86-89

### 作者简介

刘孟 (1992 ~), 男, 汉, 江西吉安人, 硕士研究生,

研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

都洪基 (1960 ~), 男, 研究生导师, 研究方向为电力系统继电保护。

陈湘如 (1988 ~), 男, 汉, 江苏泰州人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

王佳佳 (1986 ~), 男, 汉, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

(上接第 36 页)

道交通车辆直流电源的节能设计提供了参考。

### 参考文献

- [1] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] 倪海东, 蒋玉萍. 高频开关电源集成控制器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [3] 阮新波, 严仰光. 脉宽调制 DC/DC 全桥变换器的软开关技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] 吴晓. 城市轨道交通车辆辅助供电系统的仿真 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [5] 唐春林, 陈春棉. 城市轨道交通列车辅助供电系统分析 [J]. 电气开关, 2008, (1): 12 - 15.

### 作者简介

吕龙, 男 (1984 -), 汉, 工学硕士, 长春轨道客车股份有限公司基础研发部工程师, 研究方向: 轨道车辆列车控制技术。