

1.4.2.4 负载循环能力

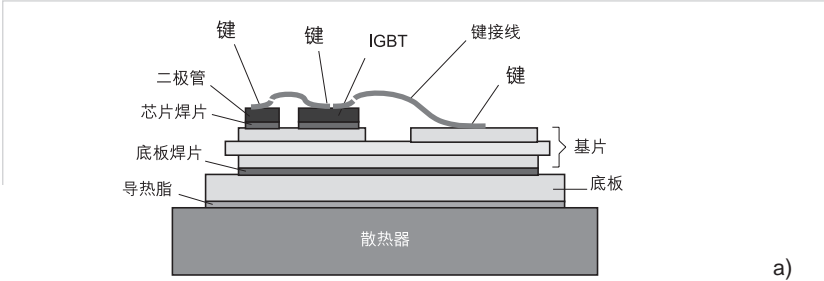
当开关频率小于 3kHz 时,特别是间歇运行时,例如,拖动、电梯或脉冲负载,负载的变化会导致模块内部连接的温度变化。模块的内部连接是指

1. 键接;
2. 芯片底部的焊接;
3. 陶瓷基片和金属底板之间的焊接;
4. 以及金属与陶瓷基片间的熔接(金属铜生长于 Al_2O_3 或 AlN 之上)。

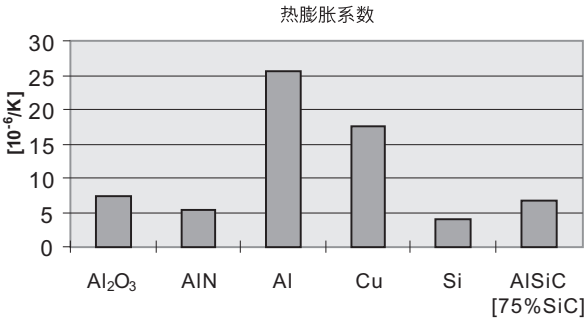
在加工和运行时,这些材料在长度方向上的膨胀系数的不一致会因受热而产生变形程度的不一致,最终导致材料的疲劳和磨损。芯片的寿命(可能的开关次数)随着芯片温度变化幅度的增加而降低。

有关的测试方法将在 2.7 章中谈到,而有关寿命对温度变化幅度的定量关系则会在 3.2.3 节有所涉及。

图 1.54a 显示了和寿命有关的 IGBT 结构详图。



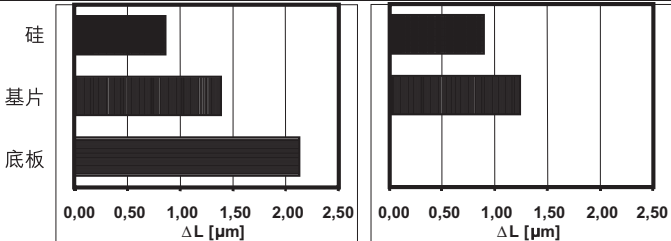
a)



b)



系统	标准 34mm 模块 0,38mm- Al_2O_3 / 底板			SKiiP 压力接触系统 0,38mm- Al_2O_3		
	T-Tkk [K]	$\Delta L/L$ [1E-6/K]	ΔL [μm]	T-Tkk [K]	$\Delta L/L$ [1E-6/K]	ΔL [μm]
硅	69,7	4,1	0,86	62,6	4,1	0,77
基板	55,4	8,3	1,38	48,3	7,8	1,13
底板	40,5	17,5	2,13			



c)

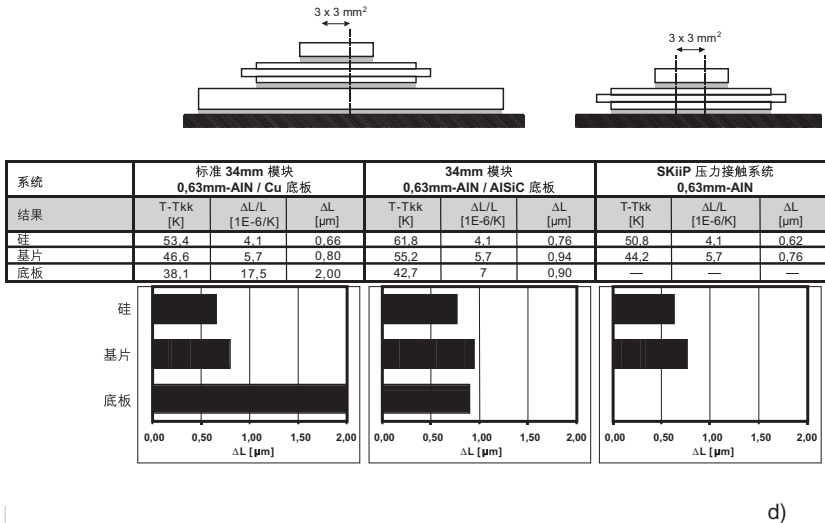


图 1.54 功率模块的热膨胀系数

- 带底板的模块封装
- 热膨胀系数
- 带与不带铜底板的封装比较 (Al_2O_3 基片)
- 带与不带铜或 AISiC 底板的封装比较 (AIN 基片)

由图 1.54 可以看出，陶瓷基片和铜底板之间的焊接最为重要，原因是它（当相邻两种物质的膨胀系数之差大致相同时）明显地具有最大的面积。因此，有必要采用高质量的焊料和焊接方法，以避免陶瓷基片在大幅温度变化时的变形和损坏。

此外，采用多块陶瓷基片，用以减小单块基片的面积也是常用的办法，这个方法可以尽可能地减小温度膨胀的绝对数值。

在另外的新式模块中，铜底板已被一块具有较小膨胀系数的底板（例如，AISiC）所代替，请参阅 1.5.4 节和 [206]。

图 1.54 还显示出，使用 AIN 陶瓷基片的模块时需要特别注意。因为 AIN 的膨胀系数虽然接近于硅芯片，可是和铜底板之间有着比 Al_2O_3 更大的差异，所以当前使用氮化铝和铜底板的模块在参数表里并没有充分体现其材料本身的优越性。

很明显，如果放弃底板以及与之相关的焊接，即可消除引起疲劳的一个重要因素，前提是从陶瓷基片到散热器之间的热传递能够得到保证，以及由此引起的较弱的热扩张效应能够得到补偿。这一点可以用 SKiiP, MiniSKiiP 和 SEMITOP 技术来实现（请参阅 1.5 章）。

为了改善芯片底部和陶瓷基片之间焊接的温度循环能力,可以

1. 使用 AlN 陶瓷基片,它与硅之间的膨胀系数之差比 Al_2O_3 更小;
2. 采用低温连接技术来代替焊接。该工艺使用金属银粉将芯片和陶瓷基片在较低温度下 ($150\text{--}200^\circ\text{C}$) 烧结在一起,从而使材料之间的热应力在加工过程中得以减小。

键接线与芯片之间连接的寿命也同样主要受两者之间热膨胀系数差异的影响。

在温度循环变化时,硅在长度方向上的膨胀系数比较小 (4.7ppm/K),但构成发射极和栅极连接的金属化铝表面却有着明显较高的膨胀系数 (23ppm/K)。

由两者差异引起的应力会在金属化表面引起晶体颗粒的重新排列。这一过程被称为“重构”。

重构过程(常常可以通过芯片表面颜色的发散来识别)会导致键接的失效 [304]。采用覆盖聚酰亚胺的方法可以有效的减弱金属化铝表面的重构。

因此,采用覆盖过的键接线可以使芯片上键接的寿命大大延长。但是,随之而来的是出现了另一种失效机制。在温度循环变化时,DCB 基片与键接线之间热膨胀系数的差异使键接线发生机械弯曲,但由于芯片端的“键接脚”被覆盖而提高了机械强度,所以接近于 DCB 基片端的“键接脚”有可能发生断裂。

在寿命试验中,当焊接层老化而导致模块失效时,最为常见的现象是键接线失效。对这一现象的解释是,随着焊接层逐步破裂脱落,芯片的热阻增加,导致温度升高,这又使键接线和焊接层受到更高的应力。最后,这个正反馈效应导致模块失效。

无论如何,在失效机制的研究中,焊接的老化是一个重要的课题。对于高温差循环 ($\Delta T \approx 100\text{K}$) 来说,采用当今的技术,焊接与键接可以达到大致相同的寿命。

在现代的温度循环试验中,常常采用测量和记录功率模块的通态电压与热阻的方法。因此,不论是焊接还是键接的失效(通态电压逐级增加)都可以被观察到。

在平板式 IGBT 和二极管中,键接被具有更高温度循环能力的压接所代替。今天,人们正致力于将这一直接压接技术应用到模块中。