

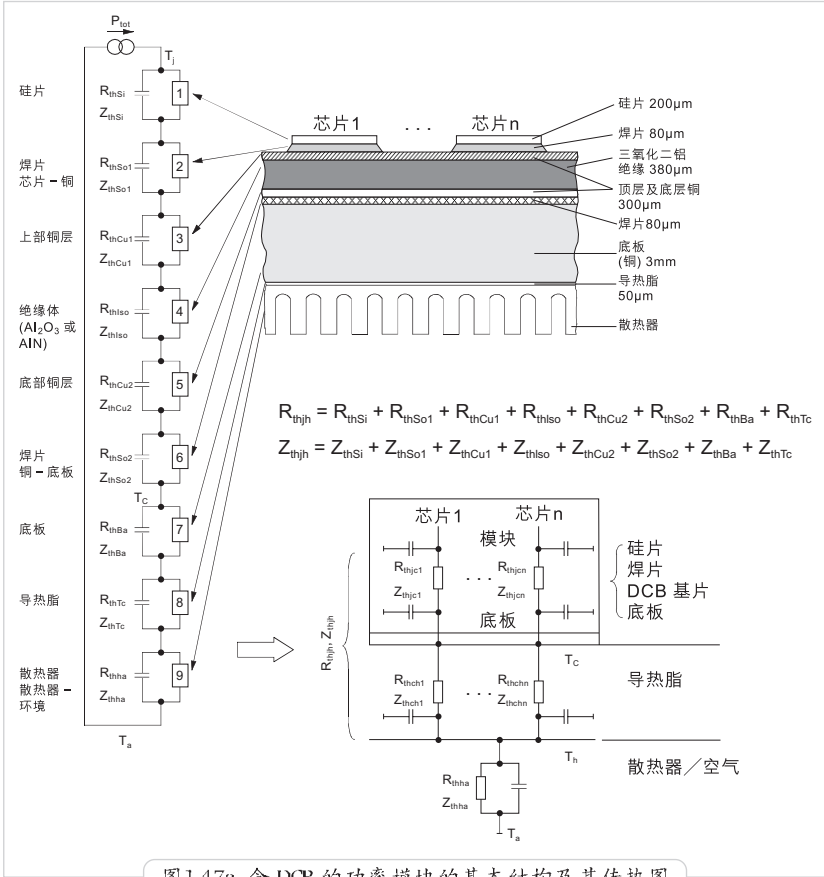
1.4.2.2 散热能力

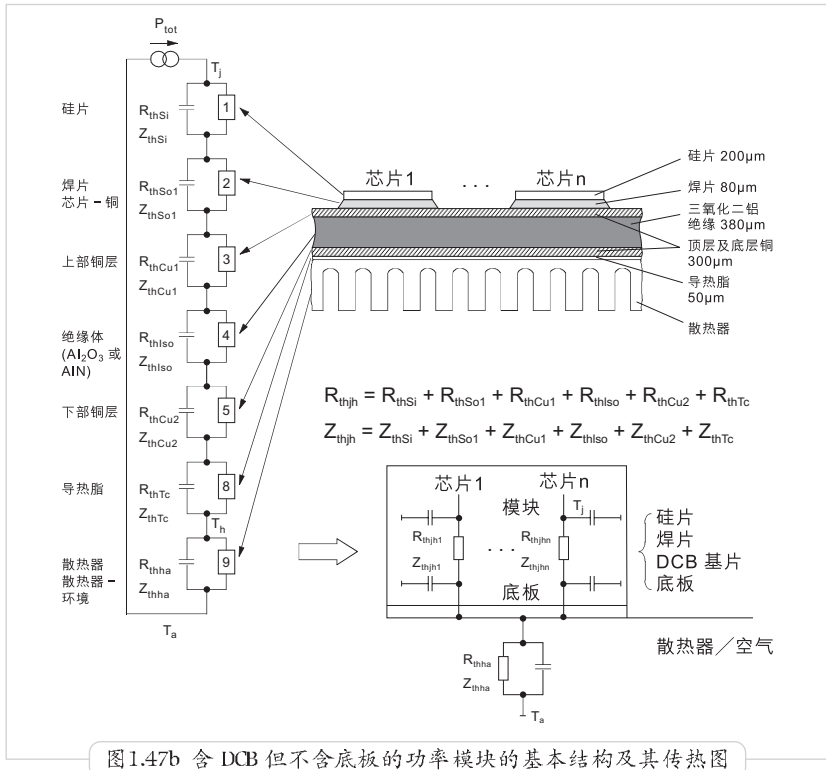
为了尽可能地充分利用芯片的理论电流承载能力, 芯片所产生的功率损耗需要通过连接部分和绝缘层直接并安全地被引导至散热表面。

图 1.47 从原理上显示了模块中哪些内部参数会影响其散热能力 (内部热阻 R 、内部热抗 Z)，这些参数与散热能力以及环境条件一起共同决定了模块所允许的最高损耗 (电流、开关频率、电压等)。

图 1.47 中所示的 RC 元件并没有真实地反映热传导的物理过程, 它们只是被用来形象地表明从芯片到散热器之间功率和温度是由上而下流动的。但由于热阻 R_{th} 是一个静态的参数, 所以它可以被用来反映相应的结构单元。

然而, 电容替代了真实的物理单元, 它可以由实际体积元件的热容量 (参数为体积和单位热容) 通过变换而得到, 其条件是存在一个共同的热参考点。





芯片在导通与截止状态下以及在开关过程中会产生损耗 P_{tot} 。其散热能力可以用降落在芯片与散热器之间的温度差来描述：

$$\Delta T_{jh} = T_j - T_h$$

以上 T_j 是芯片温度， T_h 是散热器温度。这个温差与损耗之商即为热阻 R_{thjh} （静态），在过渡过程中我们还使用热抗 Z_{thjh} 。

图 1.47 和 1.48 显示了模块内部各单元对 R_{thjh} 和 Z_{thjh} 的影响：

1. 芯片（表面、厚度、几何形状和放置）；
2. DCB 基片的构造（材料、厚度、基片上表面的结构）；
3. 芯片与基片之间连接的材料和质量（焊接、粘贴）；
4. 底板的存在与否（材料、形状）；
5. 基片底面与底板之间的焊接（材料、质量）；
6. 模块的安装（表面状况、与散热片表面的热连接、导热脂或导热膜的厚度与质量）；
7. 在复杂的功率模块中还有芯片之间的发热交互影响（热偶合）。

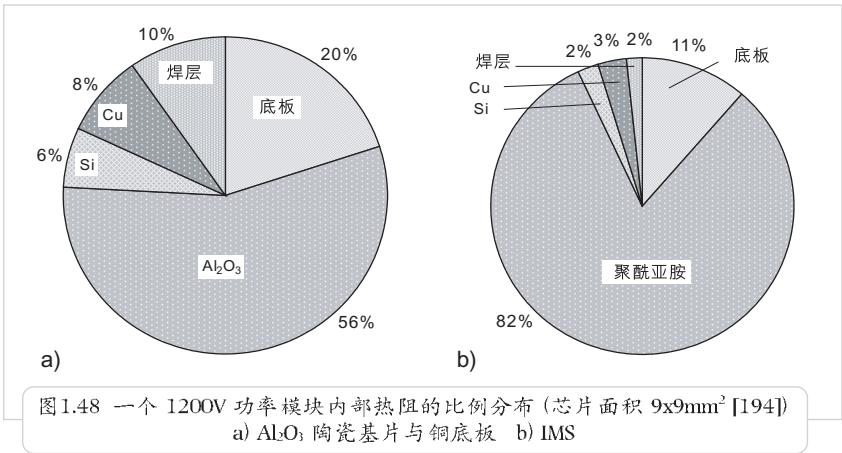
对于具有底板的模块来说,其外部热阻以及热抗的符号为 R_{thch} 以及 Z_{thch} (从底板至散热片),而其内部热阻以及热抗(从芯片至底板)的符号为 R_{thjc} 和 Z_{thjc} :

$$R_{thjh} = R_{thjc} + R_{thch}$$

$$Z_{thjh} = Z_{thjc} + Z_{thch}$$

对于不含底板的模块来说便无法做此区分。

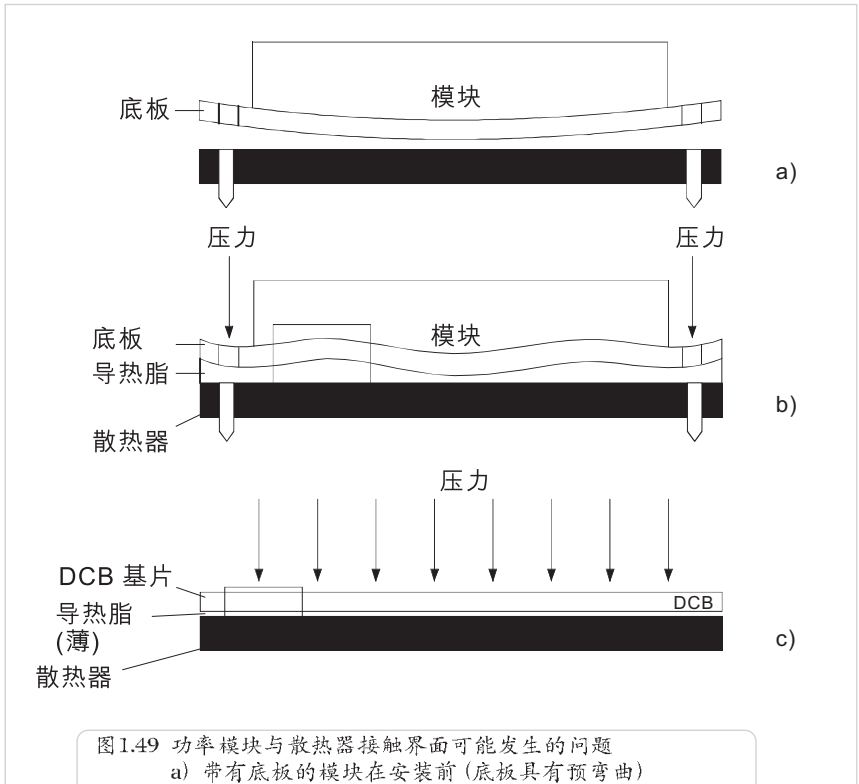
图 1.48 显示了上述影响因素分别在模块的 R_{thjc} 中所占的比重。左图的模块采用了目前最为广泛应用的 Al_2O_3 (三氧化二铝) DCB 基片和铜底板,右图的模块则采用了绝缘金属基片 (IMS)。



由图可见,热阻的最大一部分是模块的内部绝缘(如果采用薄膜或其他外部绝缘方式作为替代的话,则热阻还会再增加 20%—50%)。标准的三氧化二铝(热导率 $\lambda = 24 \text{W/m} \cdot \text{K}$) DCB 基片的纯度为 96%。但若采用高纯度(99%)的 Al_2O_3 或 AlN (氮化铝 $\lambda = 150 \text{W/m} \cdot \text{K}$) 则可使热阻得到进一步的改善。所以,特别是在高绝缘电压的模块(绝缘陶瓷因而比较厚)中, AlN 目前已受到了广泛的欢迎。

尽管底板由高导热材料 ($Cu: \lambda = 393 \text{W/m} \cdot \text{K}$) 所组成,但由于其厚度 (2.5—4.5mm) 的关系使它的热阻仍然占据了模块热阻的相当部分。采用较薄的底板只能够有限地降低这一比重,原因在于厚的底板具有扩张温度场的效应,从而使芯片下层的热穿透面积增加。在不含底板的模块中,由于底板以及底面焊接的热阻不再存在,因而能够补偿这种热扩张效应的降低。

还有,如果采用合适的封装技术(将大面积的 DCB 压接在散热器上),则芯片与基片之间的连接可以更紧密。作为对照,含有底板的模块在焊接时会产生不可避免的变形,且因为底板只能够在四周通过螺钉来固定到散热器上(图 1.49),模块与散热器的表面接触并不完全。



同样不可以忽略的是芯片和基片以及基片和底板(如果存在的话)之间的接触热阻,该界面多通过焊接而形成(例如, $\lambda = 75 \text{ W/m}^2\text{K}$)。在不采用底板的情况下,这一部分的热阻可以减少约 50%。

基片的金属表面在热阻中所占的比例主要由上表面铜层 (Cu : $\lambda = 393 \text{ W/m}^2\text{K}$) 的结构所决定,该结构被用来放置芯片并实现模块内部的电气连接。由于基片底部铜层在垂直方向上的散热基本上不受任何阻碍,所以热量的传导以及扩张效应实际受到芯片下面铜层的几何形状所限制。在 [194] 中讨论了一个实验:将 $6.5\text{mm} \times 6.5\text{mm}$ 芯片置于 Al_2O_3 陶瓷基片上,当芯片面积等于铜层面积时,其热阻比铜层面积为芯片面积的十倍时的热阻大 15%。

硅芯片在总热阻中所占的比例随着芯片厚度的增加而增加,而芯片的厚度又是由其正向截止电压以及制造技术所决定的。

还有,芯片的面积决定了芯片与底板或散热器之间的传热面积。

一方面,热阻随芯片面积的加大而减小,原因是传热面积在增加;另一方面,随着芯片面积与周长之比例的增加,芯片内部热流的热耦合对热阻的影响也在增加,温度扩张效应会减弱。这两个相反的趋势导致了如图 1.50 所示的热阻 R_{thjc} 与芯片面积的关系。

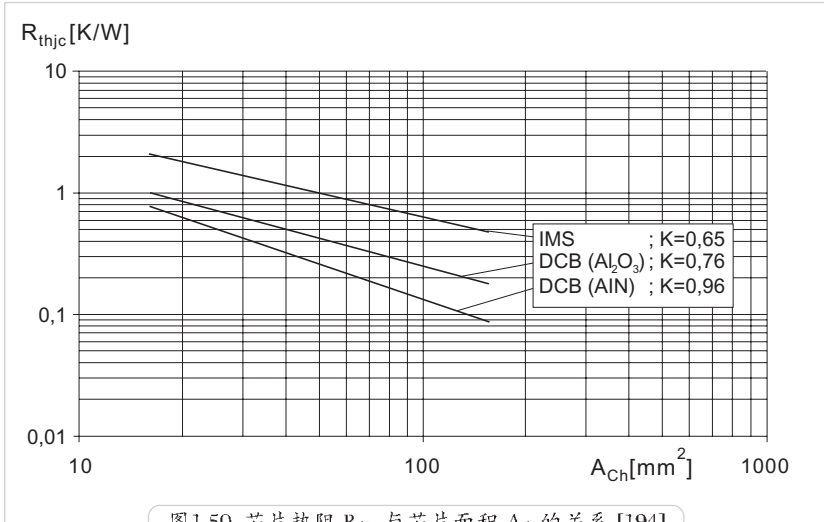


图1.50 芯片热阻 R_{thjc} 与芯片面积 A_{ch} 的关系 [194]

如果采用高热导率的基片(例如,AlN陶瓷基片),由于芯片面积对温度扩张效应几乎没有什么影响,所以热阻 R_{thjc} 与芯片面积 A_{ch} 大致呈线性关系。陶瓷基片的导热能力越差,则热阻 R_{thjc} 和芯片面积 A_{ch} 之间的非线性程度就越严重。

因此,在此类构造中,芯片面积的增加强烈影响了芯片的最大功率密度(芯片利用率)。

类似的相关性也适用于模块安装对散热器的影响。一般在安装时需要采用导热脂或导热薄膜,此类导热层的热导率相对较差($\lambda = 0.8\text{W/m}\cdot\text{K}$),构成了在模块底板和散热器之间的过渡热阻 R_{thch} 。除了受导热层的厚度影响以外,随着芯片面积的加大,热阻 R_{thch} 占芯片与散热器之间过渡热阻 R_{thjh} 的比例也随之增加。

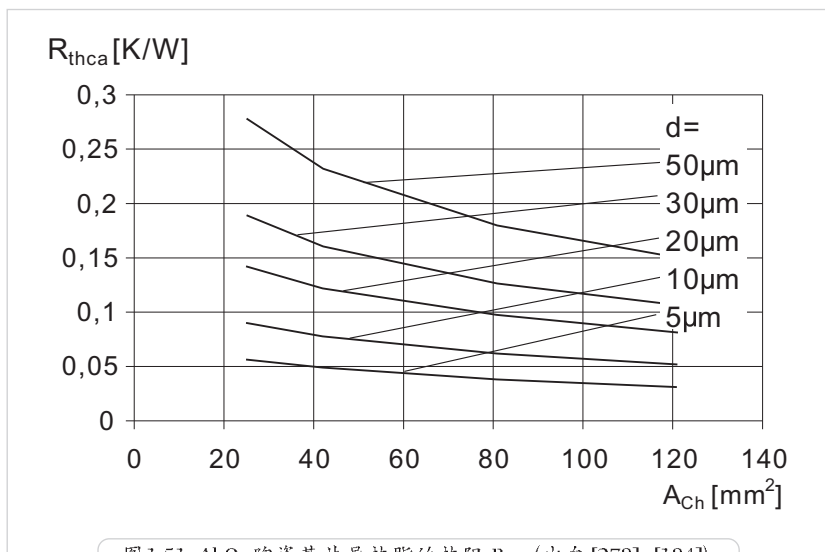


图 1.51 Al₂O₃ 陶瓷基片导热脂的热阻 R_{thca} (出自 [279]、[194])

一方面,图 1.51 显示了一个优化的安装技术(薄的导热脂层)对热阻的影响。

另一方面,我们也可以看到,采用较大芯片来提高功率的做法会受到热参数的限制,例如,当导热脂为 30 μm 厚时,其热阻约占 50 安培 IGBT 芯片的 30% (9mm×9mm)。

因此,目前用于模块的芯片最大面积约为 30mm² (IMS) 以及 150mm² (Al₂O₃)。为了达到更高的功率,可以通过分散热源的方案来实现(尽可能多地将芯片并联)。

尽管芯片之间存在着或多或少的热耦合,但为了获得较小尺寸的模块,晶体管 and 二极管芯片的布置必须相当紧凑。

根据 [194] 中所示的计算,对于 Al₂O₃ 陶瓷基芯片来说,当芯片之间的距离为:

$$a = 0.58 \cdot \sqrt{A_{ch}}$$

则应当考虑由热流耦合而引起的芯片温度的增加。

如前所述,除静态的热参数外,以热抗来描述的动态热性能,也是功率模块的非常重要的参数。

图 1.52 显示了不同芯片面积下三氧化二铝陶瓷基片模块的热抗。

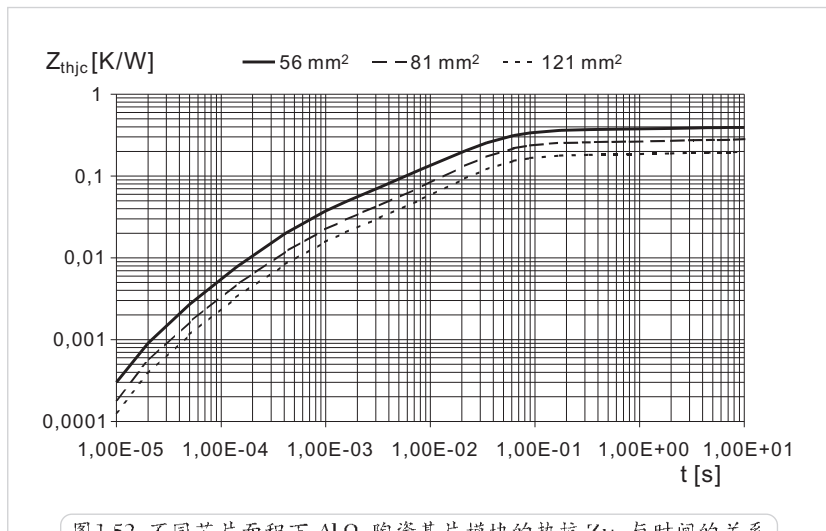


图 1.52 不同芯片面积下 Al_2O_3 陶瓷基片模块的热抗 Z_{thjc} 与时间的关系

在模块结构一定的情况下，不同芯片面积的热抗曲线可以通过平行移动而得到。换句话说，热抗的绝对值随芯片面积的不同而变化，但指数函数中的时间常数则维持不变。

对于一个给定的结构，不同芯片面积的热抗可以如同热阻一样用下述公式来计算：

$$Z_{thjc1}(t)/Z_{thjc2}(t) = R_{thjc1}/R_{thjc2} = (A_{Ch2}/A_{Ch1})^K$$

在这里，指数 K 被用来描述热滞效应的影响，它可以由图 1.50 得到 [194]。