

全碳化硅(SiC)模块技术

All SiC Module Technique

邓隐北，张子亮，唐庆伟 编译

河南亮明科技有限公司

摘要 :SiC 器件等下世代功率半导体，具有高耐压、低损耗以及可高频、高温操作这些优越的特性。为了最大限度地发挥这些优势，开发了器件由铜插头连接、由环氧脂密封的新型功率模块结构。利用这一结构，提高了温度循环容限 (cycle Tolerance)；利用银烧结材料，已确认在 200℃ 下工作的高可靠性；而且对新结构特点的充分发挥，可实现模块的低电感设计。试制的全 SiC 模块，可使用于太阳能光伏发电的功率调节器 (conditioner) 提高效率并大幅度小型化。

关键词 :碳化硅，功率芯片，铜插头，环氧树脂，温度循环容限，低电感设计，模块技术

中图分类号: TN6 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517(2014)11-4-134

1 前言

功率模块愈益广泛适用于需要有效进行电力变换的领域，例如，近年来引人注目的太阳能光伏发电和风力发电等可再生能源领域，以及混合式汽车及电动汽车等车载领域。

作为功率半导体主力的硅器件，正在接近性能的极限。而作为一种新型宽禁带半导体材料，碳化硅因其出色的物理及电特性，正越来越受到产业界的广泛关注。SiC 电力电子器件的重要优势在于具有更高的击穿电场强度 ($2\sim4\times10^6$ V/cm)，其最高结温可达 600℃ 等。由于这一半导体器件的高耐压、低损耗、可高频高温操作的优越特性，突破了硅基功率半导体器件电压 (数 KV) 和温度 ($<150^\circ\text{C}$) 所导致的严重局限性。随着 SiC 材料技术的进步，各种 SiC 电力电子器件被研发出来。SiC 功率器件又可分为 SiC-MOSFET (金属氧化物半导体场效应晶体管) 与 SiC-SBD (肖特基势垒二极管)。本文，将对可最大限度发挥 SiC-MOSFET 和 SiC-SBD 等此类 SiC 器件所具性能的全 SiC 模块技术予以介绍。

2 全 SiC 模块结构

图 1 所示为功率模块的原来结构与全 SiC 模块的新结构，原结构中功率芯片 (chip) 的配线由铝线形成，是将 DCB (直接铜结合) 基板与金属基板用焊锡焊接的 [图

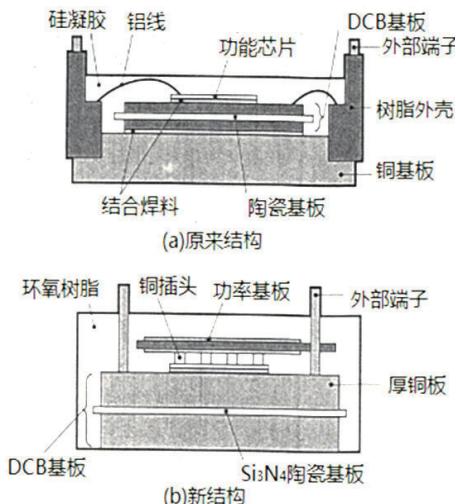


图1 全SiC模块的新结构

1(a)]。而在图 1(b) 所示的新结构中，功率芯片的配线采用了由铜接头连接的无导线、无焊接的结构，此外，由 Si_3N_4 (氮化硅) 陶瓷基板贴合厚铜板的散热基板，取代了原来的 DCB 基板。即使结构中无金属基板，也能达到低的热阻抗。因此，对供给功率芯片大电流时芯片上的温升能予以抑制，故可实现 SiC 器件的高密度安装和模块的小型化。与此同时，因采用作为密封材料的环氧树脂，与原来的硅凝胶比较，能缓解功率芯片结合部的变形和应力，因而提高了可靠性。

3 实现全 SiC 模块的主要技术

要确保 SiC 器件在高温操作中的可靠性，以及实现快速的开关切换是开发中的课题。新结构中，考虑到模块高温操作可靠性之一的功率循环容限，取决于芯片上、下结合材料的寿命，因此，为提高高温操作的可靠性，必须使构成模块的结合材料高耐热化；同时，保护器件及其结合部的密封材料也需要达到高耐热化。此外，为了适应 SiC 器件的高速切换，限制浪涌电压的模块内部电感必须减小，新结构中因为是无导线连接结构，故能实现低电感化。

3.1 利用高耐热性密封材料提高可靠性

新结构中的密封材料采用了环氧树脂。为实现模块的高温操作，环氧树脂的高耐热化是必不可少的。这里，着眼于环氧树脂的玻璃转移温度 T_g 进行了树脂的开发。图 2 为对环氧树脂利用热机械分析 (TMA) 测定结果的模式。相应于温度变化的试料长度，对其长度的变化量进行了测定，由此，求得线膨胀系数 (CTE)。 T_g 为耐热性指标之一，在 T_g 以上的温度区域 α_2 ，环氧树脂的 CTE 急剧增大。因此，为获得在 200℃ 操作时的高可靠性，需要 T_g 在 200℃ 以上的树脂。为验证模块最佳的树脂物理性质，立足于树脂的 CTE 进行了应力分析。在图 3 所示的三维 1/4 模型中，对芯片上部与下部的焊料结合部相当多的变形，以及 Si_3N_4 陶瓷基板上的最大主应力进行了分析。在 -40℃ ~ 200℃ 温度循环条件下环氧树脂的 CTE 处于 $10\sim25 \times 10^{-6}/\text{K}$ 范围内变化时，变形和应力最大值示于图 3。另外，纵轴值是把环氧树脂的 $\text{CTE}=25 \times 10^{-6}/\text{K}$ 时的变形和应力作为 100 的结果。

在新结构中，焊料的寿命是对温度循环容限产生影响更大的因素之一。一般来说，焊料寿命与焊料产生的变形

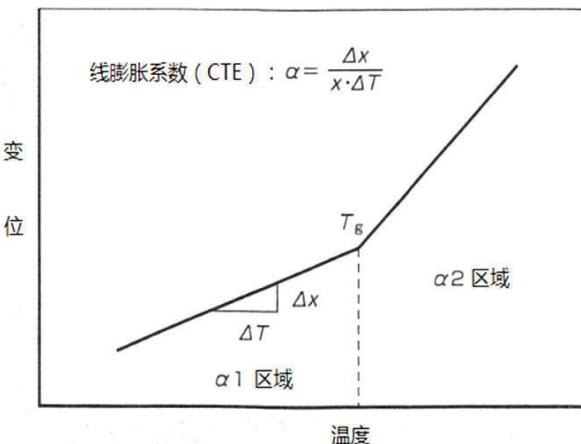
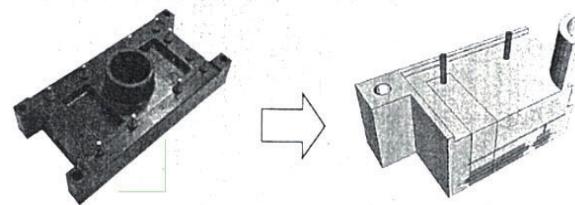
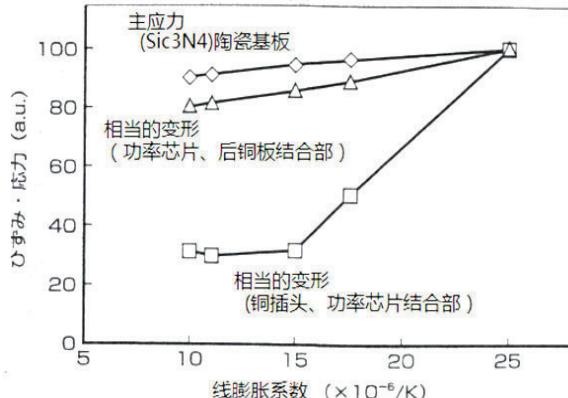


图2 玻璃转移温度与线膨胀系数 (TMA法)



(a)模块外观与分析模型(三维1/4模型)



(b)模块内的变形、应力与树脂CTE的相互关系

图3 模块内部的结构分析 (变形、应力)

范围成反比例。因此，为提高图 3 所示高温的温度循环容限，必须减小环氧树脂的 CTE。

这里，对充填于环氧树脂的二氧化硅等填料 (filler) 量进行调整的方法，可作为减小 CTE 的方法。一般，因填料增加的数量会导致树脂的弹性率、粘度增加等问题，故 CTE 需要总的匹配。新结构中，对填料量进行优化、减小 CTE 的同时，还要开发应用考虑到填充性粘度的环氧树脂。而且，要将这一开发树脂材料的硬化条件最佳化，已经确认 T_g 在 200℃ 以上。由此，提高高温时的温度循环容限，及与分立 (discrete) 产品同样的连续自动送进成型 (transfer moulding)，这二者是可以兼备的。

为验证高温时的可靠性，对所开发环氧树脂密封结构的温度周期进行了试验。在原来功率模块的温度循环试验中，高温侧的温度条件通常是在比相应操作温度低 25℃ 的条件下设定的。在新结构中也同样，要在比原来硅功率器件高温侧高 50℃ 以上的高温条件下进行试验，温度范围为 -40℃~+175℃。

图 4 所示为通过温度周期试验的热阻抗变化结果。由于结合材料的劣化，可见到热阻抗的增加，故直至 500 周期之前，对从初期开始的热阻抗变化进行了测定，其结果已确认热阻抗已大幅上升。

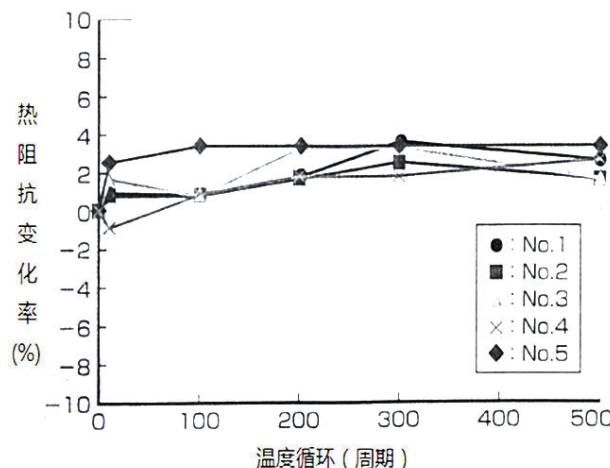


图4 温度循环试验结果

图5所示为芯片、铜板间焊料结合部的超声波探伤图像。新结构中，按照与初期的图像比较后确认，即使经过500循环在结合部也未发现裂纹[图5(a)]；而图5(b)为另一结构中热阻抗不佳的一个例子。经试验后的结合部产生变形，在芯片外周结合部的裂纹一直处于发展状态。根据这些结果，即使在比原来试验条件更严格的-40~+175条件下，开发的环氧树脂密封结构中抑制了结合材料的劣化，确保了充分的温度循环容限。此外，有关高温侧200上限的温度循环试验，一直在进行着检测验证。

3.2 利用高耐热结合材料确保200℃下的操作可靠性

用于原来结构功率模块的结合材料，主要是融点250以下不含铅的锡—银系列焊料。为发挥SiC器件的优越特点，未来的操作温度必须达到300或300以上，原来的焊接材料是难于满足这一温度要求的。因此，采用了铜插头这样的配线结构，并应用了能适用更高操作温度的银烧

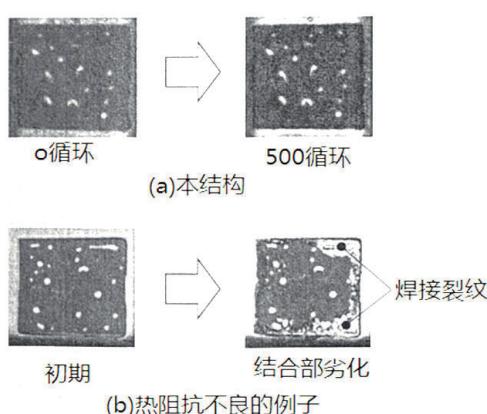


图5 温度循环试验中的结合部劣化

结技术。银烧结材料的最大优点是：在300℃左右以下的低温度下能进行焊接，烧结后具有与整块银相同的融点。图6为采用银烧结材料，将铜插头与功率芯片结合后的断面。

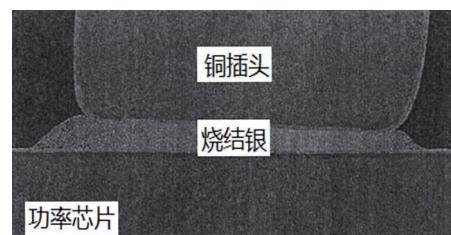


图6 采用银烧结技术的功率芯片结合部断面

此前，在采用焊接的新结构中，对 $T_f=150$ ℃以下的功率循环容限进行过验证。这次，为了评价对银烧结的功率循环容限，在比此前更严格的条件200℃下进行了操作试验($T_f=150$ ℃)。

图7的试验结果中，实线为原来结构，虚线为使用焊料的新结构，其功率循环容限如图7所示。因模块的结构不同，故障的机理(mechanism)不同，这二根直线的斜率也是不同的。 $T_f=150$ ℃时，新结构的功率循环容限比原结构中的已大幅度提高。另方面，在低温振幅条件下功率循环容限更大的提高， $T_f=125$ ℃下预计提高容限约100倍以上。由此将银烧结技术应用于新结构场合在 $T_f=175$ ℃时，功率循环容限为图中标示的曲线，与原来结构比较达到10倍以上的容限提升。因此，若密封材料等周边材料实现高耐热化，通过银烧结技术的应用，即使功率模块在200℃以上高温操作下，也可望达到高的可靠性。

3.3 低电感设计

作为SiC器件特点之一的低开关损耗性能，在高频率

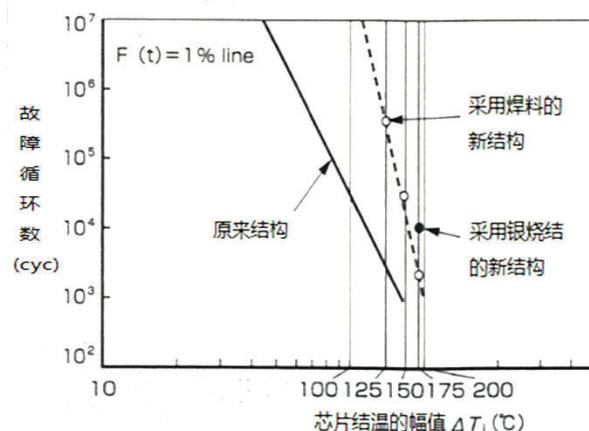


图7 200℃操作试验中的功率循环容限

下操作时可最大限度发挥该特性的优势。这种情况下能抑制器件耐压以下的浪涌电压。在开关频率高时，必须减小功率模块内部的电感。因此，在新结构中通过缩短电流的路径，在结构上将构成模块的基板并列配置，可使内部电感设计得最小。图 8 所示为额定电压 1200V、100A 的 [2in1] (U 系列第五代) 模块，其原结构与新结构的比较结果。

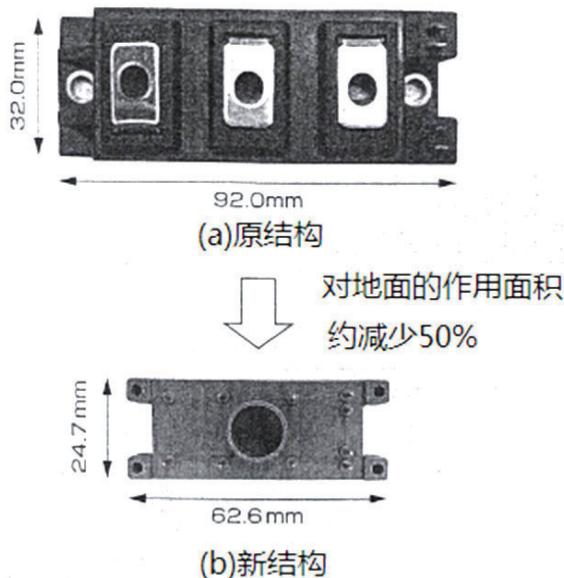


图8 [2in1]模块对地面作用面积的尺寸

新结构与原来结构比较，其对地面的作用面积 (footprint) 尺寸约减小 50%，电流路径也缩短了。而且，新结构中沿着功率基板与厚铜板在功率芯片的上面和下面，形成了方向相反的电流路径，由于磁场的相互作用，实现了内部电感的减低。对内部电感分析的结果，相当于原来结构的内部电感约 50nH，在新结构中则为 12nH 左右，电感已减小到 1/4 以下。

4 全SiC模块的适应范围

为应用以上所述的全 SiC 模块技术，对使用了 SiC-MOSFET 和 SiC-SBD 的全 SiC 模块（额定值 1200V、100A 的 2in1 模块）进行了试制 [图 9(a)]。另外，对 SiC-MOSFET，已使用与产业技术综合研究所共同开发的 IEMOS（注入与外延 MOSFET）。

为对由这一全 SiC 模块配置在变频器上的实机进行评价，试制了用于光伏发电的采用三相 3 电平回路的功率调节器（功率 20kW）。图 9(b) 所示为主回路部的外观图，装

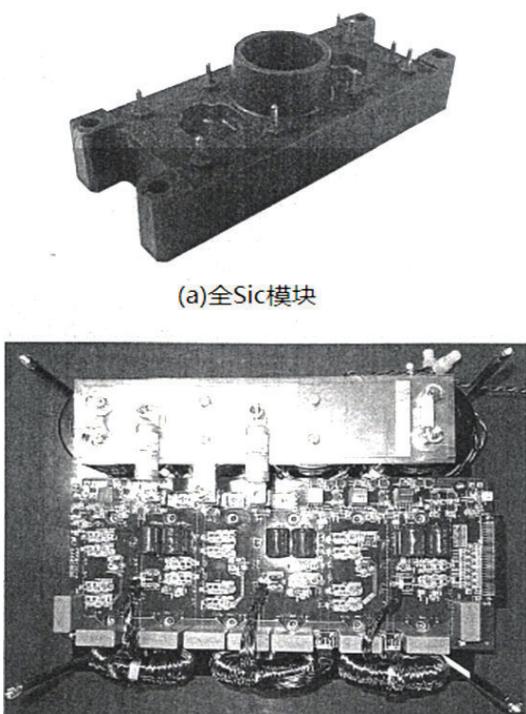


图9 用于太阳能光伏发电的功率调节器

入了 9 块全 SiC 模块，装置整体比原来机器实现了 1/4 的小型化，同时已经确认：主回路部的效率提高达到 99%。

实践证明：已开发的全 SiC 模块，在实际应用中不仅能小型化，而且能实现高效率化。

5 结束语

SiC 功率器件使开关损耗降低，在高温环境下的工作特性优良，被人们期待为下一代的低损耗元件。配置 SiC 器件可实现必须的高温操作、高可靠性、低电感的全 SiC 模块技术已经构建。应用这一技术，由配置 SiC-MOSFET 和 SiC-SBD 的试制模块，验证了太阳能光伏发电用功率调节器的小型化和高效率化。SiC 功率器件适用于太阳能发电、风力发电等的 DC/AC 逆变器，混合动力车和电动汽车的充电器，以及工业化生产设备和空调的功率转换器等。在这些用途中，作为节能省电的关键器件得到了商品化。今后，为对其他领域的适应性进行评估，最大限度发挥 SiC 器件的性能优势，因而有利于电力电子技术领域的发展，这正是我们所迫切期望的。

碳化硅电力电子器件在提高电能利用效率和实现电力电子装置的小型化方面将发挥越来越大的优势。碳化硅电力电子器件能提高电能利用的效率，来实现电能损失的减

少，因为相对于硅器件，碳化硅器件在降低导通电阻和减小开关损耗等方面具有优势。比如，由二极管和开关管组成的逆变电路中，仅将二极管材料由硅换成碳化硅，逆变器的电能损失就可以降低 15~30% 左右，如果开关管材料也换成 SiC，则电能损失可降低一半以上。利用碳化硅制作的电力电子转换器实现小型化的特性：更高的开关速度、更低的损耗和更高的工作温度。碳化硅器件能以硅器件数倍的速度进行开关。开关频率越高，电感和电容等储能和滤波部件就越容易实现小型化；电能损失降低，发热量就会相应减少，因此可实现电力转换器的小型化；而在结温方面，硅器件能在更高结温和环境温度的情况下工作，这

样就可以缩小或者省去电力转换器的冷却结构。

在电力电子器件应用的众多领域，比如输电系统、配电系统、电力机车、混合动力汽车、各种工业电机、光伏逆变器、风电并网逆变器、空调等白色家电、服务器及个人电脑等，碳化硅器件将逐步地展现出其性能和降低系统成本方面的优势。作为下一代电力电子器件的主要方向，碳化硅电力电子器件将为电力电子带来重要的技术革新，并推动电力电子领域在今后二、三十年的发展。

（原文出处：梨子田 典弘，日向 裕一郎，堀尾 真史，All-SiC モジュール技術，富士电机技报 2012 vol.85 No.6p403-406）