

# 高压大容量功率半导体器件技术及其应用

丁荣军, 窦泽春, 罗海辉  
(中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

**摘要:** 功率半导体器件作为电气化进程的核心组成部分, 其本身在不断迭代提升, 并促进电气化装置和应用的发展。功率半导体器件的关键技术主要体现在4个方面: 新材料、新结构、新封装、智能化。针对不同应用的场景, 功率半导体器件的要求也不尽相同, 文章通过对轨道交通、电动汽车和电力系统等典型场景特点的分析, 阐述了精细沟槽型绝缘栅双极型晶体管、碳化硅和高功率密度智能化集成功率器件等的应用; 功率半导体器件目前仍然处于飞速且稳健的发展阶段, 随着技术不断成熟, 新技术的不断涌现, 4个关键技术均存在巨大的发展空间。

**关键词:** 功率半导体器件; 新材料; 新结构; 新封装; 智能化; 典型应用  
**中图分类号:** TN303 **文献标识码:** A

## Technology and application of high-voltage and large-capacity power semiconductor devices

DING Rongjun, DOU Zechun, LUO Haihui

(CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

**Abstract:** As the core component of electrification process, the power semiconductor device keeps improving, and constantly promotes the development of electrification devices and applications. The key technologies of power semiconductor devices mainly include four aspects: new material, new structure, new package and intelligence. The requirements for power semiconductor devices are different in different application scenarios. By analyzing the characteristics of typical application scenarios of rail transit, electric vehicle and electric power system, this paper analyzed and described the applications of fine trench insulated gate bipolar transistor, silicon carbide and intelligent integrated power devices with high power density. At present, power semiconductor devices are still in a rapid and steady development stage. Existing technologies are maturing and new technologies are emerging, there is a huge space for the development of key technologies in the four aspects.

**Keywords:** power semiconductor device; new material; new structure; new package; intelligence; typical applications

## 0 引言

功率半导体器件广泛应用于社会的各个方面。随着整个社会电气化程度不断加深, 对电能发生、输送、使用和存储等方面的要求也在不断提高, 推动着应用于电能变换和提高电能质量等电力电子技术的发展。

功率半导体器件作为电力电子装置的核心, 器件技术的升级决定了系统装置的升级, 是传统工业向现代工业转型的核心技术<sup>[1]</sup>。

## 1 功率半导体器件关键技术

功率半导体器件按照是否可控可以分为不可控

基金项目: 国铁集团科技研究开发计划项目 (K2021J046)

第一作者: 丁荣军 (1961—), 男, 博士, 正高级工程师, 中国工程院院士, 功率半导体与集成技术全国重点实验室主任, 长期从事电力电子器件、牵引变流和交流传动系统的创新研究与成果转化工作; E-mail: dingrj@csrzc.com

引用格式: 丁荣军, 窦泽春, 罗海辉. 高压大容量功率半导体器件技术及其应用[J]. 机车电传动, 2023(2): 1-13.

Citation: DING Rongjun, DOU Zechun, LUO Haihui. Technology and application of high-voltage and large-capacity power semiconductor devices[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(2): 1-13.

型器件、半控型器件和全控型器件3类。其中,不可控型器件不能通过控制信号控制器件的通断,如二极管器件;半控型器件可以通过控制信号控制导通但不能控制关断,如晶闸管;全控型器件可以通过控制信号控制导通及关断,具体可以细分为电流控制型与电压控制型,电流控制型器件如门极可关断晶闸管(Gate Turn Off thyristor, GTO),电压控制型器件如绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)和金属氧化物半导体场效应晶体管(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET)。目前,硅(Si)基IGBT器件凭借其优异的性能得到了广泛应用,在过去的30年内不断地更新换代,根据产品特征,其主流产品可分为7代,具体如图1所示。



图1 IGBT发展历程

Fig. 1 Development history of IGBT

不同的应用场景对功率半导体器件的需求存在差异,图2为某些典型应用场景中的需求及其响应路径。在轨道交通、电力系统和电动汽车应用场景中,其关注度和差异性主要集中在容量、过载能力、能效、冗余设计、工作环境和经济效益等方面,对器件的功率密度、可靠性、可控性、过流能力和损耗等特性提出了差异性要求。为了使功率半导体器件响应这些需求,往往需要从新材料、新结构、新封装、智能化等关键技术入手,不断优化器件性能<sup>[2-5]</sup>。

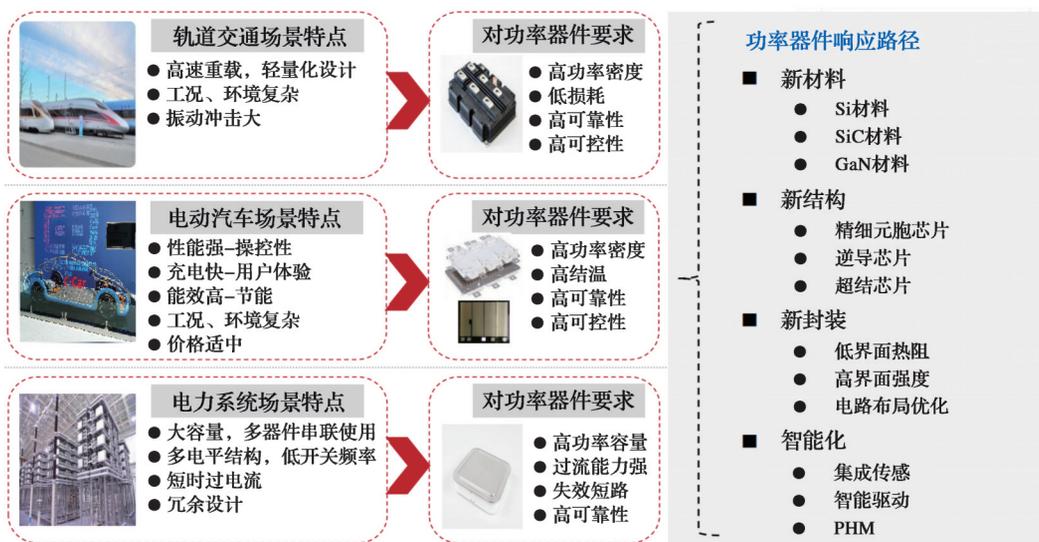


图2 典型应用场景中功率半导体器件的要求和响应路径

Fig. 2 Requirements and responses paths of power semiconductor devices in typical application scenarios

### 1.1 新材料

目前,尽管Si材料在功率半导体中占据了主导地位,但随着应用不断朝着更高功率密度、更高频率和更高的工作温度的方向发展,Si基功率半导体器件性能也在逐渐接近其物理极限。近年来,宽禁带半导体材料逐渐涌现并且快速发展,例如碳化硅(SiC)、氮化镓(GaN)、三氧化二镓( $Ga_2O_3$ )、金刚石。其中,SiC和GaN已实现商业化量产, $Ga_2O_3$ 和金刚石仍处于实验室研究阶段,这些材料的部分物理特性如表1所示<sup>[6-7]</sup>。

#### 1.1.1 SiC器件

在SiC的功率半导体器件中,SiC MOSFET受到广泛的关注并且发展迅速,相比于Si基IGBT,SiC MOSFET具有以下优势<sup>[8]</sup>: ①由于SiC材料具有高载流子饱和和漂移速度,SiC MOSFET具备更低的导通损耗; ②SiC材料具有更高的临界击穿电场,在相同的耐压条件下,使得SiC MOSFET的漂移区厚度可以做到Si基

IGBT的1/10; ③SiC材料具备更高的热导率,使得SiC MOSFET可以实现更高的工作结温。

表1 半导体材料的特性

Table 1 Properties of semiconductor materials

材料	禁带宽度/ eV	击穿场强/ ( $MV \cdot cm^{-1}$ )	饱和电子漂移 率/( $10^7 cm \cdot s^{-1}$ )	热导率/ ( $W \cdot (cm \cdot K)^{-1}$ )
Si	1.10	0.3	0.86	1.5
4H-SiC	3.26	3.0	2.00	3.7
GaN	3.44	3.5	2.50	1.3
$Ga_2O_3$	4.90	8.0	2.00	11.0
金刚石	5.47	10.0	2.00	20.0

#### 1.1.2 SiC加工工艺

SiC加工工艺较复杂,其材料本身的缺陷密度高影响栅氧可靠性;同时,由于SiC材料硬度高,减薄工艺容易导致碎片问题。对于栅氧工艺,业界主要采用“高温热氧+N<sub>x</sub>O”的方式降低界面态,提升栅氧质量<sup>[9]</sup>。近年来,也出现了采用沉积SiO<sub>2</sub>的工艺获得比

“高温热氧+N<sub>x</sub>O”退火工艺质量更好的栅氧膜层<sup>[10-11]</sup>。为了进一步提升SiC MOSFET的功率密度, 采用精细光刻技术, 大幅缩小元胞沟槽尺寸, 降低芯片比导通电阻, 提升芯片电流密度。

### 1.1.3 SiC芯片

由于SiC工艺的进步, 各大厂商自2010年陆续推出SiC MOSFET芯片, 2015年Cree公司开发的1 200 V SiC器件采用中心注入技术, 常温比导通电阻低至2.7 mΩ·cm<sup>2</sup>, 高温比导通电阻达到3.9 mΩ·cm<sup>2</sup><sup>[12]</sup>。2012年罗姆公司开发出双沟槽SiC MOSFET, 耐压达到1.26 kV, 比导通电阻做到了1.41 mΩ·cm<sup>2</sup><sup>[13]</sup>。

### 1.1.4 SiC应用

针对电网与轨道交通领域的需求, 各大厂商也陆续开发出高压、大电流产品。在国外, ABB公司开发了3 300 V/100 A的SiC MOSFET<sup>[14]</sup>, Cree公司推出了3 300V/45 A的SiC芯片<sup>[15]</sup>, 三菱公司开发了6 500 V/45 A的SiC MOSFET芯片<sup>[16]</sup>。在国内, 中电五十五研究所推出的1 200 V/50 A SiC芯片的比导通电阻达到了6.4 mΩ·cm<sup>2</sup>, 1 700 V/50 A的器件的比导通电阻达到了19.7 mΩ·cm<sup>2</sup>, 株洲中车时代半导体有限公司针对电动汽车和轨道交通领域分别开发了1 200 V和3 300 V的全SiC产品, 1 200 V全SiC器件比导通电阻低至4.2 mΩ·cm<sup>2</sup>, 3 300 V全SiC器件比导通电阻为22.3 mΩ·cm<sup>2</sup>。

## 1.2 新结构

为了逼近材料性能的物料极限, 产业界和学术界对功率器件结构进行了深入研究, 不断有新的器件结构被提出, 包括精细沟槽结构、逆导结构和超结结构等<sup>[17]</sup>。

### 1.2.1 精细沟槽结构

精细沟槽IGBT如图3所示, 通过缩小台面宽度(Mesa)实现元胞结构精细化, 可以增强发射极载流子存储效应, 使载流子浓度大幅度提升, 同时显著降低芯片导通压降, 从而降低芯片损耗。电流密度、导通压降与台面宽度的关系如图4所示。国际、国内厂商均陆续发布了精细沟槽IGBT产品, 英飞凌公司在2016年发布了EDT2芯片, 电流密度达到275 A/cm<sup>2</sup><sup>[18-19]</sup>。瑞萨公司采用非均匀间距的精细沟槽结构优化了电流密度和短路能力的折中关系<sup>[20-21]</sup>。富士公司采用了分离沟槽栅(Split Gate, SG)和屏蔽沟槽栅技术(Trench Shield Gate, TSG), 其中分离沟槽栅可降低米勒电容和开通损耗, 降幅可达到10%, 同时可降低通态压降13%<sup>[22]</sup>, 降低导通损耗26%<sup>[23]</sup>。三菱公司的第7代IGBT提升了阈值电压的一致性<sup>[24-25]</sup>。株洲中车时代半导体有限公司提出采用嵌入式沟槽发射极(Recessed Emitter Trench, RET)结构与嵌入式沟槽陪栅结构(Recessed Dummy Trench, RDT)的精细沟槽IGBT产品, 其中RET结构在相同关断损耗下通态压降可降低

17.5%, RDT结构可降低米勒电容, 提高开通di/dt, 实现开通损耗降低27%<sup>[26-27]</sup>。

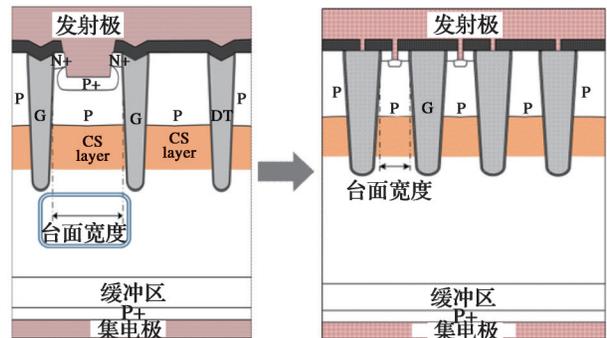


图3 精细沟槽IGBT示意图

Fig. 3 Diagram of fine trench IGBT

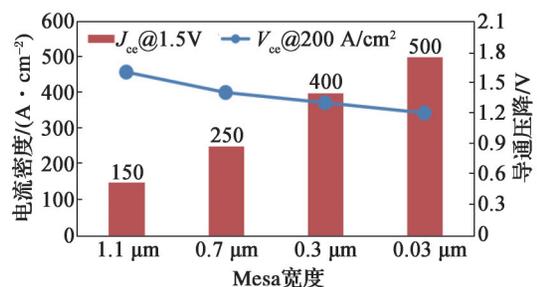


图4 台面宽度与电流密度及导通压降的关系图

Fig. 4 Diagram of relations among mesa width, current density and forward voltage drop

### 1.2.2 逆导结构

IGBT在实际应用中一般需要反向并联1个续流二极管(Free Wheeling Diode, FWD), 将IGBT和FWD进行片内集成成为了IGBT芯片发展的一个新方向, 即为逆导型(Reverse Conducting, RC)IGBT。RC-IGBT的结构如图5所示。RC-IGBT实现了IGBT和FWD共享芯片面积, 增大有效散热面积, 提升电流密度。常规IGBT与RC-IGBT的热阻对比如图6所示, IGBT芯片热阻降低30%, FWD芯片热阻降低60%, 等效电流密度高达350 A/cm<sup>2</sup>。热阻的减小有效地降低器件在实际应用工况中的温升, 尤其在电机发生堵转或整流的特殊工况下, FWD的性能空间得到大幅度提升。

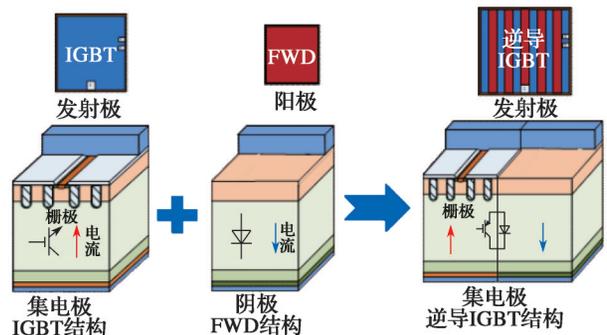


图5 逆导IGBT结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of the RC-IGBT

英飞凌公司在2008年针对电磁炉的应用推出了RC-IGBT, 并在2016年开发了6 500 V二极管控制型逆

导 IGBT (Reverse Conducting IGBT with Diode Control, RCDC-IGBT), 该产品主要针对轨道交通领域。2016年富士公司开发出第7代RC-IGBT, 总体损耗与第7代IGBT和FWD相当, 并于2018年推出750 V/1 000 A M655电动汽车用模块。虽然各功率半导体厂商均有逆导产品推出, 但是由于逆导技术需要兼顾IGBT和FWD的各方面性能, 总体处于起步阶段<sup>[28-33]</sup>。

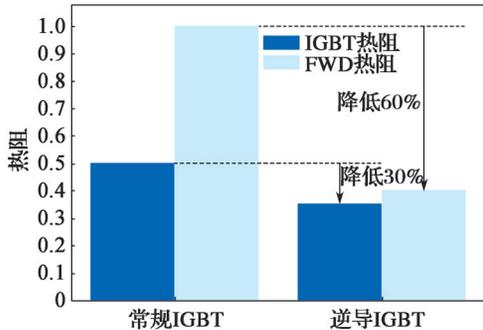


图6 常规IGBT与逆导IGBT热阻对比

Fig. 6 Comparison of thermal resistance between conventional IGBT and RC-IGBT

### 1.2.3 超结结构

对于传统功率器件的比导通电阻与击穿电压的折中选择受限于材料。对于Si而言, 比导通电阻 $R_{sp}$  (单位 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )与耐压 $B_V$ 的关系为 $R_{sp} = 6.1 \times 10^{-9} B_V^{2.5}$ , 该关系式也被称为硅极限关系式, 而超结技术的提出可以打破硅极限。超结结构如图7所示, 其原理为将PN结引入到常规“电阻型”耐压层中, PN结的N柱和P柱在器件体区周期排列, 在器件工作过程中相互耗尽, 电场在器件体区纵向和横向同时扩展, 与传统结构的功率器件相比, 超结功率器件可以在相同耐压下显著降低比导通电阻, “ $R_{sp}-B_V$ ”的关系从2.5次方可以降为1.3次方。

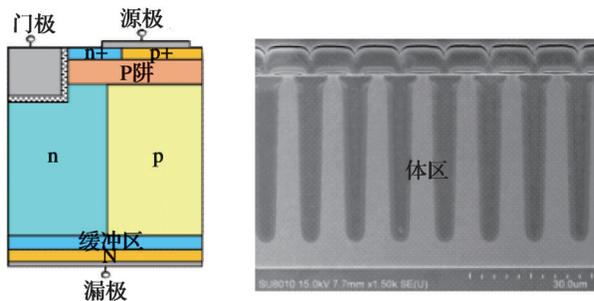


图7 超结结构示意图

Fig. 7 Diagram of super-junction structure

英飞凌公司于1998年首次推出CoolMOS超结产品<sup>[34-36]</sup>, 目前已经发展至第7代, 基于多步外延工艺, 元胞尺寸缩小至 $5.5 \mu\text{m}$ , 相比第6代缩小52%, 芯片外延层增大至12层, 其中600 V CoolMOS产品的比导通电阻降低至 $8 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ <sup>[37]</sup>。安森美公司的超结产品SuperFET发展到第5代, 同样采用多步外延技术, 外延

层增加至6层, 产品电压等级覆盖600~850 V。东芝公司的超结DTMOS产品发展到第4代, 采用深沟槽刻蚀技术, 产品电压等级覆盖500~800 V, 华润公司微超结产品发展到第3代, 采用多步外延技术, 产品电压等级覆盖600~800 V。目前, 国内外众多半导体厂商对超结技术研发多年, 但受其工艺难度与成本的影响, 产品尚未得到广泛应用。

### 1.3 新封装

随着功率半导体器件应用领域的不断扩展, 对功率半导体器件的性能要求也越来越高, 因此需要开发高效热管理、高可靠性界面连接和电路拓扑优化等关键技术来提升功率半导体器件的性能。

#### 1.3.1 高效热管理

IGBT模块封装结构主要使用的材料包括覆铜(或铝)陶瓷衬板、散热基板、灌封材料和外壳包封材料。其中, 覆铜(或铝)陶瓷衬板作为裸芯的直接承载体, 起到电气连接和绝缘的作用, 同时也是芯片传导散热的重要通道; 散热基板作为衬板与散热器之间的连接材料, 同时也为整体模块提供力学和结构支撑, 是芯片散热的重要通道。衬板使用的陶瓷材料通常有氧化铝陶瓷、氮化铝陶瓷和氮化硅陶瓷等。

直接散热结构由于散热路径更短, 大幅度降低了整体热阻。图8为直接液体冷却IGBT模块结构示意图。其中, 基板为针翅结构, 在应用中可实现直接液体冷却, 无需导热硅脂层和外部散热器, 与传统平面基板结构相比, 整体热阻降低30%以上。

平面封装结构采用金属层替代芯片表面的铝键合引线互连, 如图9所示。通过平面封装结构将IGBT模块的发热损耗通过上、下2个方向进行散热, 实现双面

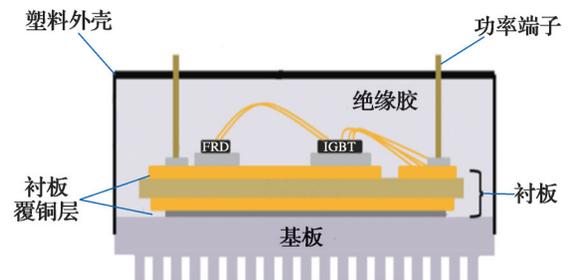


图8 直接液体冷却IGBT模块结构

Fig. 8 Module structure of direct liquid cooled IGBT

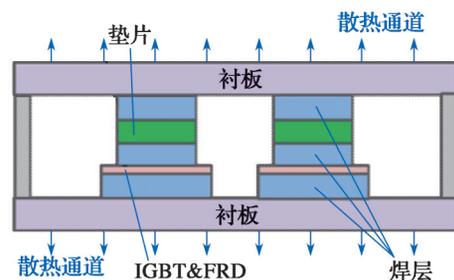


图9 平面封装结构

Fig. 9 Structure of flat package

冷却 (Double Sided Cooling, DSC)。采用对称设计, 可将 IGBT 模块的散热效率提高 1 倍, 等效结壳热阻降低 50% 左右, 提高了模块的热性能和温度可靠性。

### 1.3.2 高可靠性界面连接

#### 1) 功率端子超声键合技术

传统封装模块的端子常采用焊接方式固定在绝缘衬板金属层表面上, 在大电流周期性冲击和热循环作用下, 端子的引脚处容易出现热疲劳失效。

金属超声键合技术是有效提高导电端子可靠性的方法之一, 可实现铜功率端子引脚与金属化层之间的原子级连接, 大幅降低焊层失效率, 如图 10 所示。超声键合点处的界面微结构显示, 两者之间没有产生任何额外的界面。金属超声键合技术的工艺简单, 键合强度高, 可以承受较大的振动和冲击, 而且接触电阻较低。

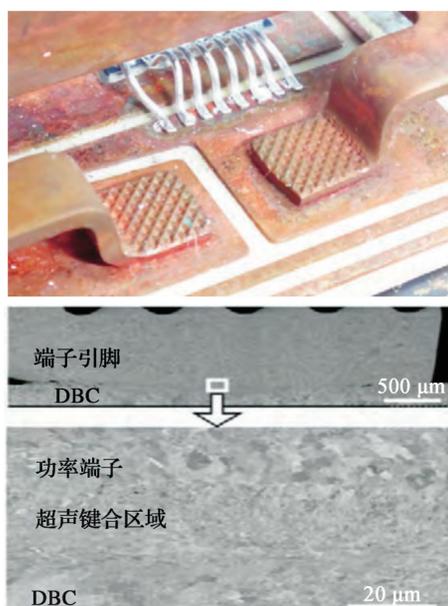


图 10 采用金属超声键合技术的功率端子及其显微结构图

Fig. 10 Power terminal with metal ultrasonic bonding and its microscopic structure diagram

#### 2) 纳米银烧结技术

半导体器件的高温应用要求芯片连接层有很高的熔点温度。银具有优异的导热和电气特性、低温烧结的能力、可接受的材料价格以及可在普通空气环境中烧结的特性, 使得银烧结技术成为目前功率半导体器件朝高温、高可靠性应用发展的主要趋势。银烧结是一种由温度催生的固态扩散过程, 纳米银烧结层有着与固体银一样的熔点温度 962 °C, 而普通焊料的熔点温度为 300 °C 左右; 电导率和热导率分别是普通焊料的 5 倍和 4 倍。在温度循环能力方面, 图 11 是银烧结层温度循环前、500 次、1 000 次、2 250 次循环之后的 X 光照片。由图 11 可知, 当温度循环完成之后, 银烧结层仍然保持了良好的形状和可靠的接触, 表现出优异的温度循环能力。

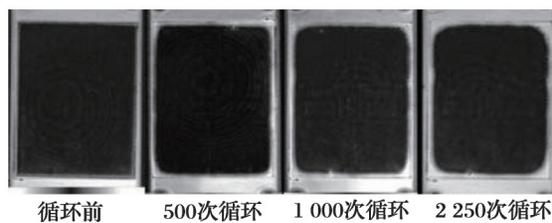


图 11 银烧结层温度循环 X 光照片对比

Fig. 11 Comparison of X-ray photograph of silver sintering layer after thermal cycles

#### 3) 铜互联技术

常用的键合线材料有铝和铜 2 种材料。其中, 铝线键合具备工艺成熟和成本较低的优点, 但是铝线键合的电气性能和热力学性能较差, 热膨胀系数大, 从而影响 IGBT 使用寿命; 而铜线/铜带具有比铝线更优良的力学、热学和电学特性, 铜线键合具备高可靠性优势, 在高功率密度和高散热应用条件下, 铜键合可有效提升模块功率循环能力。在相同电流条件下, 运用铜线键合工艺功率器件的功率循环寿命是铝线键合的 10 倍左右。

### 1.3.3 高性能电路拓扑

芯片通过引线、铜排等部件与模块端子形成电路连接, 最终组成模块。这种连接方式不可避免地引入了寄生电感 (也称为杂散电感)。寄生电感过高会带来器件关断过压的风险, 降低模块寄生电感对于优化模块开关特性、保证器件安全运行非常重要。叠层母排的设计方法, 利用互感相消的原理, 可将模块寄生电感大幅降低, 其结构如图 12 所示。在保证绝缘耐压的前提下, 将正极直流母排与负极直流母排尽量靠近, 相比于分离式母排设计, 寄生电感降低 30% 以上。

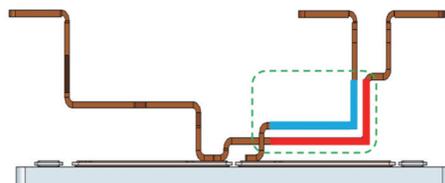


图 12 叠层母排

Fig. 12 Laminated busbar

## 1.4 智能化

数字化时代使得功率器件的智能化设计 and 应用成为可能。自感知、自诊断、主动温控、故障预测与健康 管理 (Prognostic and Health Management, PHM) 等技术均是功率器件智能化的发展方向。

### 1.4.1 自感知

智能自感知技术通过在功率芯片或者模块内部集成传感器实现对芯片和模块的工作状态的实时监控, 其目的主要是保证器件在恶劣工况下仍然能够安全可靠运行。集成传感技术通常包括温度传感技术和电流传感技术, 其示意图如图 13 所示。对于温度传感技术, 目前直接在芯片中集成温度二极管, 使用温度二极管

替代了早期的负温度系数热敏电阻 (Negative Temperature Coefficient, NTC), 集成的温度二极管的检测速度和检测精度都远高于 NTC。对于电流传感技术, 主要通过独立元胞区域的镜像电流监控芯片总电流, 该传感技术对过流和短路的保护速度高于传统驱动电路的退饱和和检测。三菱公司于 2014 年率先在 IGBT 芯片上集成温度二极管与镜像电流传感器, 用以监控芯片的结温和电流<sup>[38]</sup>。2018 年英飞凌公司提出在 IGBT 芯片上集成电流传感技术, 实现过流检测<sup>[39]</sup>。同年富士公司开发了 IGBT 芯片上集成温度传感技术, 并应用于车规级模块<sup>[40]</sup>。株洲中车时代半导体有限公司开发的 L4 模块应用了电流、温度传感技术, L4 模块如图 14 所示, 实

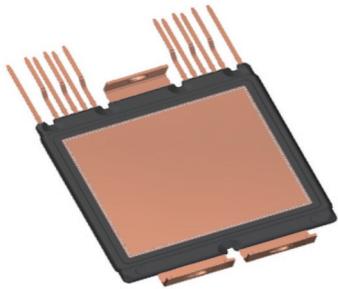


图 14 株洲中车时代半导体有限公司 L4 模块  
Fig. 14 L4 module from CRRC

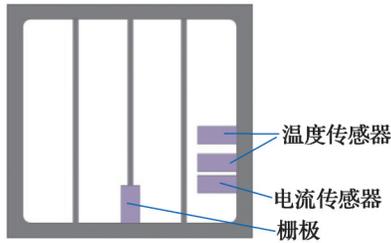


图 13 IGBT 芯片集成温度和电流传感器示意图  
Fig. 13 Diagram of IGBT chip integrated with temperature and current sensors

现对芯片的短路保护与精准结温监控。

1.4.2 自诊断

功率半导体器件作为变流装置的核心部件, 其运行状态关系到整个变流系统的安全可靠性。现阶段绝大部分变流装置并没有对功率半导体器件运行状态数据进行采集, 不具备自诊断能力, 面对功率半导体失效只能从失效表象和故障工况进行逆向分析, 然而这样分析并不准确。通过对功率半导体器件寿命研究可发现, 随着功率器件应用时间的累积, 器件老化程度不断加深, 运行状态数据会呈现出一定的变化规律, 这为功率半导体器件集成状态监测与自诊断功能提供了新思路。

以 IGBT 为例, 随着 IGBT 使用年限的增加, 其“门极-发射极”电荷量  $Q_G$ 、“门极-发射极”导通阈值电压  $V_{GE(th)}$  和饱和导通压降  $V_{CE(sat)}$  等物理参数呈现一定规律的变化, 这些参数可以通过采集一些数据来表征。其中,  $Q_G$  表征为门极充电电流  $I_G$ ,  $V_{GE(th)}$  可以由开通延迟时间  $t_{d(on)}$  表征, 结合智能算法, 即可诊断 IGBT 当前的健康状态。图 15 为具有自诊断功能的 IGBT 驱动与保护电路示意图, 驱动器以可编程器件 FPGA 为核心, 在驱动 IGBT 正常开关的同时, 选取 3 个物理量进行信号采集, 包括饱和导通压降  $V_{CE(sat)}$ 、开通电阻两端电压  $V_{Ron}$  和主回路电流变化率  $di/dt$ 。每个物理量设定多个检测阈值, 将采集值与设定阈值进行比较, 实现对 IGBT 健康状态的监控。在图 15 中,  $V_{ref1} \sim V_{ref4}$  为  $V_{Ron}$  检测阈值基准电压,  $V_{ref5} \sim V_{ref8}$  为  $V_{CE(sat)}$  检测阈值基准电压,  $V_{ref9}$  和  $V_{ref10}$  为  $di/dt$  检测阈值基准电压。IGBT 故障检测采用退饱和监测和  $di/dt$  检测相结合的方式。需要注意的是,  $V_{Ron}$  实际表征门极充电电流  $I_G$ , 开通延迟时间  $t_{d(on)}$  需要通过  $di/dt$  检测结合 IGBT 开通信号进行计算。

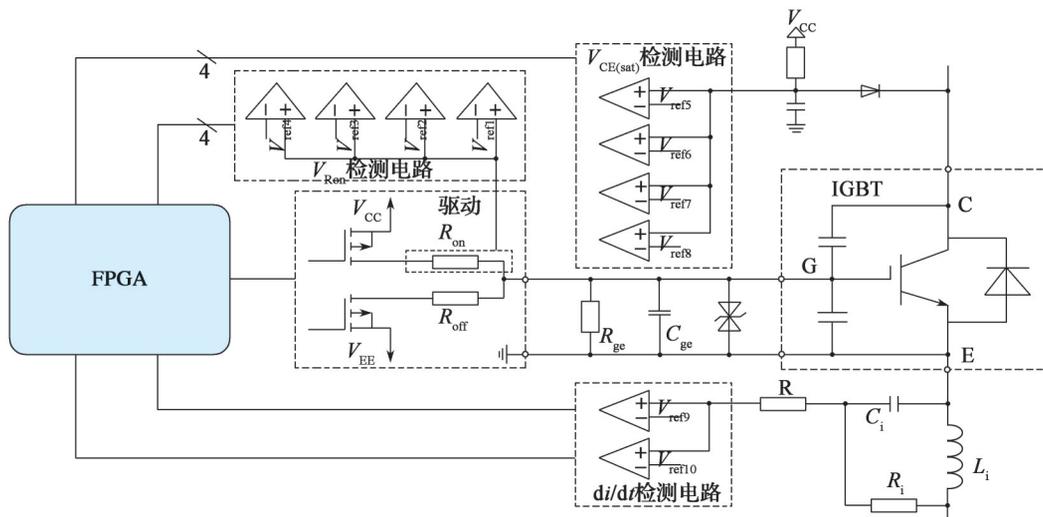


图 15 驱动与保护电路示意图  
Fig. 15 Diagram of driven and protection circuit

IGBT 的自诊断边界模型如图 16 所示。随着 IGBT 模块的老化程度不断加深, 当器件进入晚期老化或临

界失效期, 相比于健康状态, 其性能参数会发生较大改变, 模块已接近失效, 不再适合正常工作, 此时需

进行维修或更换<sup>[41-42]</sup>。

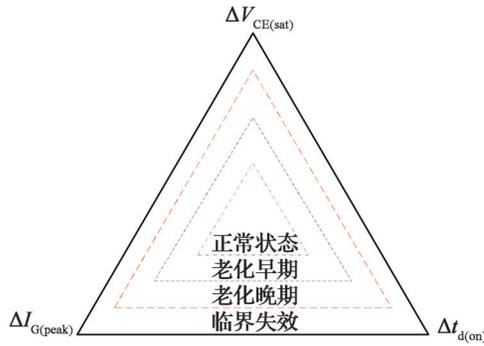


图 16 自诊断边界模型

Fig. 16 Boundary model of self-diagnosis

### 1.4.3 主动温控

由于功率半导体器件的芯片、材料和封装结构的复杂性,使其在应用中承受交变的热应力作用,引起器件材料和结构疲劳老化,进而引发器件失效。研究表明,结温及其波动对IGBT的功率循环寿命影响显著,IGBT器件功率循环数与结温变化的关系如图17所示<sup>[43-44]</sup>。

大容量功率半导体器件实际应用工况多为非平稳环境,功率在大范围内波动,其结温呈现低频大幅度

波动的特点,如何降低结温波动对半导体器件应用寿命的影响,是一个非常意义的研究课题。目前相关研究主要分为内部控制半导体器件损耗和外部调控散热效率2个方面,图18为功率器件主动结温控制原理框图。其中,外部散热控制主要通过调控散热系统散热效率达到控制IGBT器件壳温的目的;而器件损耗控制主要通过改进门极驱动电路和控制策略优化来实现。

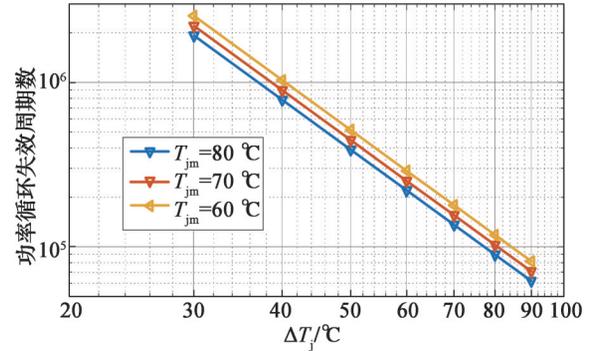


图 17 IGBT 器件功率循环数与结温变化关系曲线

Fig. 17 Relationship curve between number of power cycles and junction temperature change of IGBT device

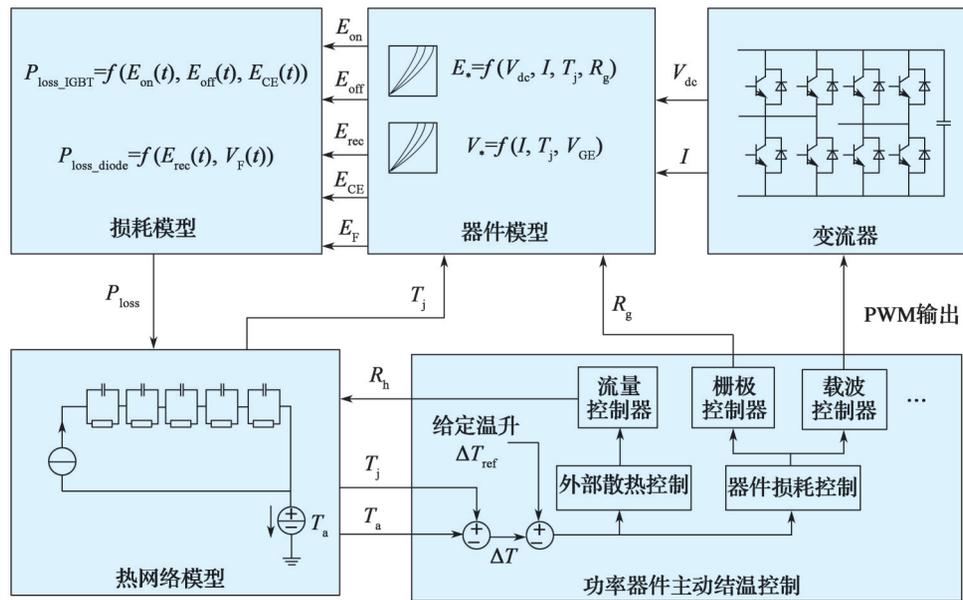


图 18 IGBT 器件主动结温控制原理图

Fig. 18 Schematic diagram of active junction temperature control of IGBT device

图19为功率半导体器件实施主动结温控制前后的结温变化曲线对比,通过主动温控,壳温波动最大可降低17.9 K,结温波动可降低21 K,有效提升了器件的可靠性和应用寿命。

### 1.4.4 故障预测与健康管理

在PHM技术中,故障预测的主要方法是研究功率半导体器件状态参数随性能退化的变化规律,建立器件的状态参数退化评估模型,并通过实时采集器件运行过程中的状态参数作为评估模型的输入,输出器件

健康状态的评估结果<sup>[45-47]</sup>。图20为IGBT模块健康状态监测与寿命评估的总体思路。通过IGBT状态监测保护电路,检测IGBT器件的集电极电流 $I_C$ 、门极电压 $V_{GE}$ 和通态饱和压降 $V_{CE(sat)}$ 等关键状态参数,并对数据进行处理,再采用健康状态评估算法对其进行故障预测与健康健康管理。

应用上述状态监测方案,通过开展加速寿命试验,对IGBT器件进行健康状态监测,掌握其性能退化规律。图21为基于加速寿命全过程的IGBT器件关键状态

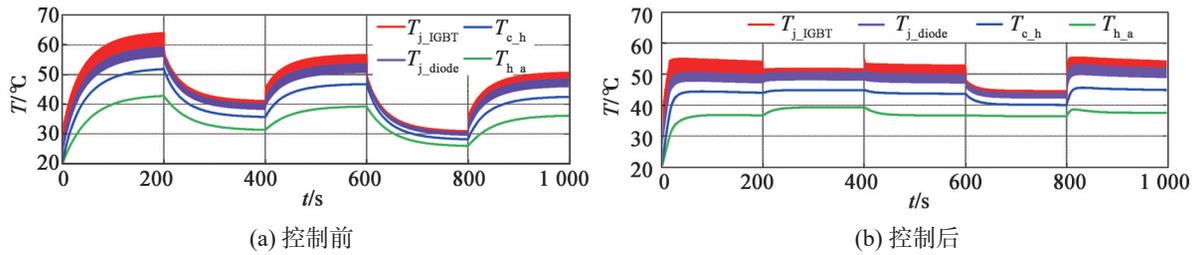


图19 主动结温控制前后IGBT器件结温变化曲线对比

Fig. 19 Comparison of curves of junction temperature change of IGBT switch device before and after active junction temperature control

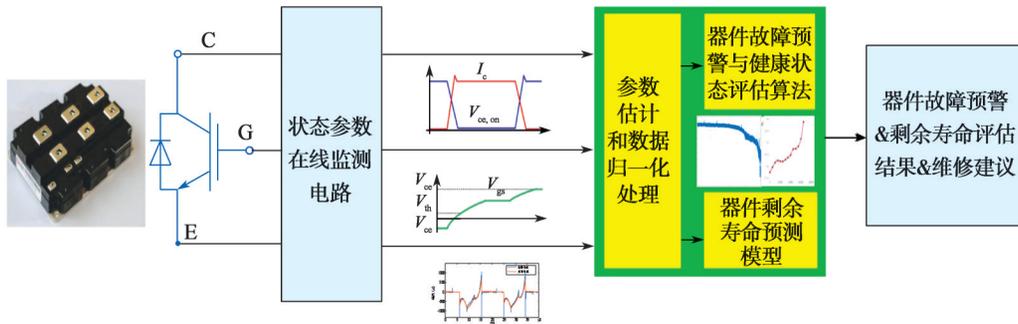


图20 IGBT器件状态监测与健康管理的总体思路

Fig. 20 General idea for PHM of IGBT device

参数退化趋势图，基于状态参数退化试验数据，构建针对IGBT器件的健康管理判据和模型，应用状态参数监测系统，可实现IGBT器件健康状态的实时诊断，依据诊断结论开展预测性维护，降低维护成本，提升整个牵引系统运用安全性与可靠性。

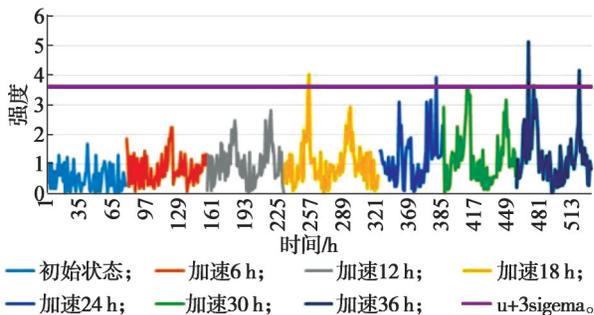


图21 IGBT器件加速试验过程状态参数监测及退化趋势

Fig. 21 State parameter monitoring and degradation trend of IGBT device during accelerated test

## 2 功率半导体器件典型应用

不同的应用场景对功率半导体器件的需求存在差异，应用方式也需要具体分析。这里以轨道交通、电动汽车和电力系统场景分别进行说明。

### 2.1 轨道交通

在轨道交通领域中，功率半导体器件需实现低能耗，提升功率密度和效率，同时满足装备小型化、轻量化和高频化的需求。

#### 1) 高功率密度智能化集成功率器件PCU

高功率密度智能化集成功率器件 (Power Convert-

er Unit, PCU)，是中车株洲电力机车研究所有限公司（简称“中车株洲所”）自主研发的一种先进的智能化高功率集成封装器件，其外形如图22所示。在结构上以功率半导体芯片为源头，在封装层面集成了功率芯片、低感功率互联电路、智能控制器、多类型传感器和快速插拔式水电连接器，将传统IGBT器件的基板和变流模块的散热器合并，实现了机、电、热、控制、快速连接等一体化高度集成，综合了IPM器件封装及组件级集成技术优势，具有高集成度、智能化、高功率密度、应用便捷高效等特点。



图22 中车株洲所PCU器件

Fig. 22 PCU from CRRC Zhuzhou institute

PCU采用了新结构（高压沟槽、逆导等）自主芯片、高效热管理、高密度互联等先进技术，其输出能力较传统器件提升15%以上，主牵引系统效率不小于98%，有效推动轨道交通装备效率不断提升；PCU入柜直联技术深度切合智能制造工艺，较传统组装效率提升90%；矩阵式快插应用技术，能为用户现场维护节约人力不小于50%，缩短更换时间不小于60%，备料成本至少降低20%；PCU集成智能驱动及PHM技术能够满足未来下一代智慧列车需求，为用户提供便捷的在线维护与故障预警等绿色服务，PCU产品深度符

合绿色产品的理念, 具体应用优势如图23所示。PCU 1.0已成功装车350 km/h双层动车组, 搭载了PCU 1.0的牵引变流器与速度350 km/h的“复兴号”高速列车用变流器相比, 容量提升7%, 体积缩小7%, 重量降低30%; 应用PCU 2.0的新一代动车及机车牵引变流系统正在研制中, 应用逆导3 300 V等级PCU器件的新一代机车变流器体积缩小20%, 重量降低10.9%, 整车可实现减小质量0.74 t, 整车每年可节省电量74万kW·h; 应用高压沟槽6 500 V等级PCU器件的新一代动车变流器(未集成电机冷却)体积缩小26%, 重量降低27%, 一列车减小质量4.2 t, 一列车每年节省电量124.9万kW·h。



图23 应用PCU的双层动车、新一代动车和机车

Fig. 23 Double-deck EMU, new-generation EMU and new locomotive with the application of PCU

## 2) 高压全碳化硅器件

全SiC器件具有高频低损特性, 相比Si基功率半导体有着明显的应用优势<sup>[48]</sup>。日本三菱公司于2015年首先发布3 300 V/1 500 A面向轨道交通的全SiC模块, 基于该模块的逆变器相比传统Si基器件的逆变器体积减小55%, 重量降低33%, 已经实现装车, 损耗降低40%<sup>[49]</sup>; 同年推出的3 300 V/750 A全SiC模块的开关损耗与Si基模块相比, 损耗降低75%。日立公司于2019年推出3 300 V/1 000 A全SiC模块, 该模块采用纯SiC MOSFET方案, 功率密度达到47 kVA/cm<sup>2</sup>, 并且具备175 °C工作结温能力<sup>[50]</sup>。2021年, 株洲中车时代半导体有限公司开发出3 300 V/47 A SiC MOSFET和SBD芯片, 并推出3 300 V/750 A全SiC模块, 具体如图24所示, 其寄生电感约为10 nH, 导通电阻约为2.3 mΩ, 高温150 °C时的导通损耗约为731 mJ, 高温150 °C时的关断损耗约为1 133 mJ。SiC功率模块已在国内轨道交通领域实现示范应用(见图24), 中车株洲电力机车研究所



(a) 3 300 V/750 A SiC模块 (b) 深圳地铁1号线

图24 深圳地铁1号线用中车SiC模块

Fig. 24 CRRC SiC module used on Shenzhen Metro Line 1

有限公司与深圳地铁集团联合自主研发国内首台地铁列车全SiC牵引变流器, 已应用于深圳地铁1号线并载客运营, 其开关频率提升6倍, 变流模块体积和重量减少40%以上, 全线路工况能耗减低15%以上, 累计运行里程超过26万km。

## 2.2 电动汽车

目前电动汽车的市场需求不断扩大, 车辆电动化趋势在未来很长一段时间内将保持强劲的增长态势。复杂多变的运行工况要求电动汽车具备动力强、效率高、高可靠性等属性, 这对电动汽车的核心功率半导体器件提出了更高的要求。

### 1) 精细沟槽IGBT

当前Si基沟槽栅IGBT模块仍然是最主流的选择, 国内外企业均开发出最新一代IGBT芯片与模块, 并得到广泛的应用<sup>[51]</sup>。英飞凌公司最新一代车规级IGBT模块HP-Drive搭载了EDT2芯片, 采用精细沟槽技术, 在同样的性能条件下体积比HP2减小30%。富士电机基于第7代IGBT芯片推出M651/652系列模块, 内部集成了电流/温度传感器, 在丰田公司部分车型上已经应用。在国内的企业中, 株洲中车时代半导体有限公司、比亚迪、嘉兴斯达等企业具备电动汽车IGBT芯片研制与模块封装测试能力。株洲中车时代半导体有限公司开发出最新一代750 V/950 A车规级IGBT模块, 该模块采用最新一代基于RET与RDT技术的精细沟槽栅IGBT芯片, 实现电流大幅提升, 模块封装方面采用了小面积端子超声焊接技术、氮化硅衬板和针翅基板等技术, 该IGBT模块在国内多个汽车主机厂的电动汽车上实现了批量装车应用。

### 2) 汽车级SiC功率器件

由于SiC器件具备高耐压、高频等特性, 在新能源汽车上的应用正在逐渐扩大, SiC功率器件小型化的特点可以大幅减小汽车自身重量带来的损耗。国内外各大厂商均在SiC功率器件上进行布局, 意法半导体的650 V SiC MOSFET模块于2016年大规模应用于特斯拉电动汽车, 安森美2021年起为奔驰提供SiC模块, 国内比亚迪2022年推出1 200 V SiC功率模块, 该模块在没有改变原有模块封装尺寸的基础上将功率提升近30%。株洲中车时代半导体有限公司开发了1 200 V/600 A全SiC S3型模块, 采用SiC平面栅MOSFET芯片, 模块封装采用端子超声键合、纳米银烧结、叠层母排等先进低感封装技术, 被动热循环能力大幅提升, 热阻低至0.11 K/W, 模块寄生电感低至8 nH, 瞬态不均流度仅2%~4%。

## 2.3 电力系统

由于电力系统高电压、高可靠性等需求, 使得其对IGBT的参数和性能指标提出了很高的要求, 压接型

IGBT器件由于具备较高的可靠性和短路特性,使其成为电力系统电力电子设备的首选。压接型IGBT采用集电极和发射极压接的方式,可有效降低热失效。数年前世界上仅有ABB、东芝等几家公司具备整套压接式IGBT的生产封装能力,但相关技术对我国严密封锁<sup>[52]</sup>。近年株洲中车时代半导体有限公司打破技术垄断,基于柔性压接技术推出了最新一代4 500 V压接式IGBT模块<sup>[53-54]</sup>,相关模块如图25所示。该模块的芯片端采用第4代DMOS压接IGBT芯片技术,具备高可靠性、低通态压降、高关断能力等优点,模块封装采用双面纳米银膜烧结、低应力高可靠性互联、柔性压接、密封陶瓷管壳封装等技术,使得该模块具备优异的抗温度冲击和高功率循环能力,满足电网领域应用需求。目前,株洲中车时代半导体有限公司压接式IGBT已经大规模应用于我国电网系统。

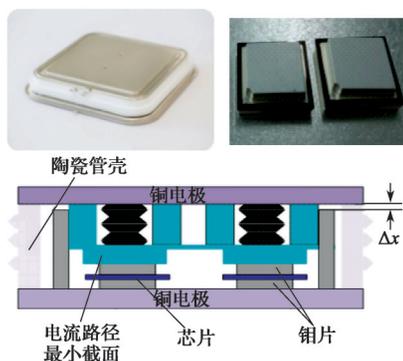


图25 株洲中车时代半导体有限公司4 500 V压接式IGBT模块  
Fig. 25 4 500 V press-pack IGBT module from CRRC

### 3 结论与展望

本文分析和介绍了高压大容量功率半导体器件的关键技术和典型应用场景,聚焦新材料、新结构、新封装和智能化等高压大容量功率半导体器件的核心关键技术,并给出了轨道交通、电动汽车和电力系统等典型场景中对高压大容量功率半导体器件的需求和应用现状。

在新材料方面,宽禁带半导体将成为主流。随着功率器件朝着更高功率密度、更高可靠性的方向发展,宽禁带半导体材料在部分应用场合将逐渐替代Si材料。此外,超宽禁带半导体材料(如 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 、金刚石等),已经在实验室中展现出优异的性能,随着技术的发展,超宽禁带材料将推进功率器件性能迈向新的台阶。

在新结构方面,以超结为代表的异构技术将成为主要发展方向。精细元胞作为当前功率器件的主流结构,已被研究得非常深入,但其始终无法打破材料极限。超结的异构结构,可打破Si材料极限的限制,降低器件导通电阻,优化器件损耗,满足功率器件对性能、可靠性等方面日益提高的需求。此外,逆导技术

的出现也将IGBT器件的发展推进到新的阶段。

在新封装方面,高效热管理、高可靠性界面互联和电路拓扑优化是其主要发展方向。现阶段以多芯片混合封装为基础的功率模块封装呈多样化趋势,基板和衬底等技术在材料和结构上各有所长,超声键合、纳米银烧结和铜互联技术促进了高可靠性边界连接,以降低寄生电感为目标的电路拓扑优化促进了器件的应用。高功率密度、低寄生电感、高可靠性、高效散热能力的新型结构,是封装技术的必然发展方向。

在智能化方面,数字时代的到来使得功率器件的智能化设计和应用成为必然。非智能化器件在应用中存在一定的不确定性,使得器件性能发挥不够充分。以自感知、自诊断、主动温控和PHM为典型的智能化技术将使得器件更利于应用,以统计机器学习为代表的状态估计与检测理论,可进一步深化应用于功率半导体的智能化方面,实现对器件的观测、估计、检测和控制,推动器件智能化的更新迭代。

在典型应用中,轨道交通的高压大容量应用场景正在逐步地普及SiC器件,各大厂家已推出对应产品,并实现了一定程度的工程应用,而且新型功率组件PCU的应用将成为轨道交通的一大发展趋势;电动汽车复杂多变的工况对功率半导体器件提出了更高的要求,IGBT的迭代发展和SiC的广泛应用目前是电动汽车领域并驾齐驱的两大主流路线,但从长远来看,SiC器件取代Si基器件是必然趋势;电力系统需求的超高压、超大容量特点使得现阶段仍以IGBT器件为主,但需要采用特殊的压接型IGBT才能保证性能要求,随着SiC器件的技术发展,其超高压超大容量的应用未来可期。

#### 参考文献:

- [1] 漆宇, 窦泽春, 丁荣军. 轨道交通用功率半导体器件应用技术的研究[J]. 机车电传动, 2020(1): 1-8.  
QI Yu, DOU Zechun, DING Rongjun. Research on power semiconductor converter technology for rail transit applications[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(1): 1-8.
- [2] 杨涛, 窦泽春, 朱武, 等. 基于SiC MOSFET的牵引逆变器在轨道交通中的应用研究[J]. 机车电传动, 2020(1): 28-33.  
YANG Tao, DOU Zechun, ZHU Wu, et al. Application research on SiC MOSFET inverter in rail transit[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(1): 28-33.
- [3] 何凯, 王幸智, 田恩, 等. 新一代高压SiC器件在轨道交通牵引系统应用中的热管理技术[J]. 机车电传动, 2020(5): 56-61.  
HE Kai, WANG Xingzhi, TIAN En, et al. Thermal management technology of new-generation high-voltage SiC devices applied in rail transit traction system[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(5): 56-61.
- [4] 李华, 万伟伟, 唐雄辉, 等. SiC器件在城轨车辆牵引系统

- 上的应用研究[J]. 机车电传动, 2020(5): 45-48.
- LI Hua, WAN Weiwei, TANG Xionghui, et al. Application of SiC devices in traction system of urban rail vehicles[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(5): 45-48.
- [5] 赵炫, 蒋栋, 刘自程, 等. SiC 功率器件在轨道交通行业中的应用[J]. 机车电传动, 2020(1): 38-44.
- ZHAO Xuan, JIANG Dong, LIU Zicheng, et al. Application of silicon carbide power devices in rail transit[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(1): 38-44.
- [6] ALVES L F S, GOMES R C M, LEFRANC P, et al. SiC power devices in power electronics: an overview[C]//IEEE. 2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP). Juiz de Fora: IEEE, 2017: 1-8.
- [7] JAIN H, RAJAWAT S, AGRAWAL P. Comparison of wide band gap semiconductors for power electronics applications [C]//IEEE. 2008 International Conference on Recent Advances in Microwave Theory and Applications. Jaipur: IEEE, 2008: 878-881.
- [8] 孙康康, 陈燕平, 忻兰苑, 等. 3 300 V 全 SiC MOSFET 功率器件开关特性研究[J]. 机车电传动, 2020(1): 34-37.
- SUN Kangkang, CHEN Yanping, XIN Lanyuan, et al. Research on switching characteristics of 3 300 V full SiC MOSFET power module[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(1): 34-37.
- [9] KIMOTO T, NIWA H, KAJI N, et al. Progress and future challenges of SiC power devices and process technology [C]//IEEE. 2017 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). San Francisco: IEEE, 2017.
- [10] MIHAILA A, KNOLL L, BIANDA E, et al. The current status and future prospects of SiC high voltage technology[C]//IEEE. 2018 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). San Francisco: IEEE, 2018.
- [11] PETERS D, SIEMIENIEC R, AICHINGER T, et al. Performance and ruggedness of 1 200 V SiC - Trench - MOSFET [C]//IEEE. 2017 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD). Sapporo: IEEE, 2017: 239-242.
- [12] ZHANG Q J, WANG Gangyao, DOAN H, et al. Latest results on 1 200 V 4H-SiC CIMOSFETs with  $R_{sp}$ , on of  $3.9 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$  at  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ [C]//IEEE. 2015 IEEE 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD). Hong Kong: IEEE, 2015: 89-92.
- [13] NAKAMURA T, NAKANO Y, AKETA M, et al. High performance SiC trench devices with ultra-low  $r_{on}$ [C]//IEEE. 2011 International Electron Devices Meeting. Washington: IEEE, 2011.
- [14] KNOLL L, MIHAILA A, BAUER F, et al. Robust 3.3 kV silicon carbide MOSFETs with surge and short circuit capability[C]//IEEE. 2017 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD). Sapporo: IEEE, 2017: 243-246.
- [15] VAN BRUNT E, LICHTENWALNER D J, LEONARD R, et al. Reliability assessment of a large population of 3.3 kV, 45 A 4H-SiC MOSFETs[C]//IEEE. 2017 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD). Sapporo: IEEE, 2017: 251-254.
- [16] KAWAHARA K, HINO S, SADAMATSU K, et al. 6.5 kV schottky-barrier-diode-embedded SiC-MOSFET for compact full-unipolar module[C]//IEEE. 2017 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD). Sapporo: IEEE, 2017: 41-44.
- [17] 张金平, 赵倩, 高巍, 等. IGBT 新技术及发展趋势[J]. 大功率变流技术, 2017(5): 21-28.
- ZHANG Jinping, ZHAO Qian, GAO Wei, et al. New technology and development trend of insulated gate bipolar transistors[J]. High Power Converter Technology, 2017(5): 21-28.
- [18] WOLTER F, ROESNER W, COTOROGEA M, et al. Multi-dimensional trade-off considerations of the 750 V micro pattern trench IGBT for electric drive train applications[C]//IEEE. 2015 IEEE 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD). Hong Kong: IEEE, 2015: 105-108.
- [19] GEINZER T, BOEVING H, REITER T, et al. Value creation developing efficient 750 V IGBT and emitter controlled diode for automotive applications[C]//VDE. Proceedings of PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nuremberg: VDE, 2015: 1-5.
- [20] EIKYU K, SAKAI A, MATSUURA H, et al. On the scaling limit of the Si-IGBTs with very narrow mesa structure[C]//IEEE. 2016 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD). Prague: IEEE, 2016: 211-214.
- [21] EIKYU K, SAKAI A, MATSUURA H, et al. Study on the improved short-circuit behavior of narrow mesa Si-IGBTs with emitter connected trenches[C]//IEEE. 2018 IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD). Chicago: IEEE, 2018: 495-498.
- [22] OHI K, IKURA Y, YOSHIMOTO A, et al. Ultra low miller capacitance trench-gate IGBT with the split gate structure [C]//IEEE. 2015 IEEE 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD). Hong Kong: IEEE, 2015: 25-28.
- [23] SAWADA M, OHI K, IKURA Y, et al. Trench shielded gate concept for improved switching performance with the low miller capacitance[C]//IEEE. 2016 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD). Prague: IEEE, 2016: 207-210.
- [24] HONDA S, HARAGUCHI Y, NARAZAKI A, et al. Next generation 600 V CSTBT™ with an advanced fine pattern

- and a thin wafer process technologies[C]//IEEE. 2012 24th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. Bruges: IEEE, 2012: 149-152.
- [25] TAKAHASHI H, TOMOMATSU Y. Next-generation IGBTs (CSTBTs) [DB/OL]. (2002-03-01) [2023-01-16]. <https://www.monman.com/pdf/mitsubishi/CSTBT.pdf>.
- [26] YAO Yao, LUO Haihui, XIAO Qiang, et al. Low loss 820 A/750 V S3+ IGBT module with new IGBT and diode technology for EV/HEV application[C]//VDE. PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nuremberg: VDE, 2019: 1-4.
- [27] YAO Yao, LUO Haihui, XIAO Qiang, et al. A 750 V recessed-emitter-trench IGBT with recessed-dummy-trench structure featuring low switching losses[C]//IEEE. 2018 IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). Chicago: IEEE, 2018: 112-115.
- [28] LAVEN J G, BABURSKA R, PHILIPPOU A, et al. RCDC-IGBT study for low-voltage applications[C]//IEEE. 2016 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). Prague: IEEE, 2016: 347-350.
- [29] WERBER D, HUNGER T, WISSEN M, et al. A 1 000 A 6.5 kV power module enabled by reverse-conducting trench-IGBT-technology[C]//VDE. International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Shanghai: VDE, 2016: 1-8.
- [30] ADACHI S, YOSHIDA S, MIYATA H, et al. Automotive power module technologies for high speed switching[C]//VDE. International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nuremberg: VDE, 2016: 1-7.
- [31] TAKAHASHI M, HOFMANN D, YOSHIDA S, et al. Extended power rating of 1 200 V IGBT module with 7G RCIGBT chip technologies[C]//VDE. International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nuremberg: VDE, 2016: 1-7.
- [32] YOSHIDA T, TAKAHASHI T, SUZUKI K, et al. The second-generation 600 V RC-IGBT with optimized FWD [C]//IEEE. 2016 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). Prague: IEEE, 2016: 159-162.
- [33] KAMIBABA R, KANEDA M, TAKAHASHI T, et al. Low injection anode as positive spiral improvement for 650 V RC-IGBT[C]//IEEE. 2018 IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). Chicago: IEEE, 2018: 160-163.
- [34] UDREA F, DEBOY G, FUJIHIRA T. Superjunction power devices, history, development, and future prospects[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64(3): 713-727.
- [35] DEBOY G, MARZ N, STENGL J P, et al. A new generation of high voltage MOSFETs breaks the limit line of silicon [C]//IEEE. International Electron Devices Meeting 1998. San Francisco: IEEE, 1998: 683-685.
- [36] LORENZ L, DEBOY G, KNAPP A, et al. COOLMOS/sup TM/-a new milestone in high voltage power MOS[C]//IEEE. 11th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. Toronto: IEEE, 1999: 3-10.
- [37] DEBOY G, TREU M, HAEBERLEN O, et al. Si, SiC and GaN power devices: an unbiased view on key performance indicators[C]//IEEE. 2016 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). San Francisco: IEEE, 2016.
- [38] WANG Ke, LIAO Yongjun, SONG Gaosheng, et al. Over-temperature protection for IGBT modules[C]//VDE. International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nuremberg: VDE, 2014: 1-7.
- [39] KARIM R. On-Chip current sense: a new approach for over current and short circuit detection for automotive main inverter[C]//VDE. International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nuremberg: VDE, 2018: 1-4.
- [40] NAKAYAMA T, NAKANO H, YOSHIDA S. On-Chip sensor built-in IGBT modules for driving xEV motors[J]. Fuji electric review, 2018, 64(4): 186-189.
- [41] 黄先进, 李鑫, 刘宜鑫, 等. 基于量化电压并行比较的 IGBT 状态监测保护电路[J]. 电工技术学报, 2021, 36(12): 2535-2547.
- HUANG Xianjin, LI Xin, LIU Yixin, et al. Condition monitoring and protection circuit for IGBTs based on parallel comparison methods of quantized voltages[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(12): 2535-2547.
- [42] 李鑫. 具有健康状态监测功能的 IGBT 驱动电路[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- LI Xin. The IGBT gate driving circuits with health condition monitoring technique[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [43] KAMINSKI N. Load-cycle capability of HiPaks[EB/OL]. (2013-08-22) [2022-12-28]. <https://5scomponents.com/Pdf/5SYA-2043-01-Sept-04-Load-cycle-capability-of-HiPaks-.pdf>.
- [44] LUTZ J, SCHLANGENOTTO H, SCHEUERMAN U, et al. Semiconductor power devices: physics, characteristics, reliability[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 360-368.
- [45] 王彬, 曹琳. 轨道交通用 IGBT 器件寿命预测技术综述[J]. 机车电传动, 2020(1): 9-12.
- WANG Bin, CAO Lin. IGBT module lifetime prediction technology for rail transit[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(1): 9-12.

- [46] 刘敏安, 向华, 徐丽宾, 等. 机车 IGBT 模块应用失效研究[J]. 机车电传动, 2020(1): 13-17.  
LIU Min'an, XIANG Hua, XU Libin, et al. Research of IGBT module application failure for locomotive[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(1): 13-17.
- [47] 支永健, 杨德勇, 朱柄全, 等. 基于全 SiC MOSFET 的轨道交通牵引逆变器高频负面效应分析及其应对策略[J]. 机车电传动, 2020(5): 49-55.  
ZHI Yongjian, YANG Deyong, ZHU Bingquan, et al. High-frequency negative effect analysis and countermeasures of traction inverter based on all SiC MOSFET for rail transit [J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(5): 49-55.
- [48] 田伟, 谢舜蒙, 陈燕平, 等. 轨道交通混合 SiC IGBT 器件与 Si IGBT 器件应用对比研究[J]. 机车电传动, 2020(5): 67-72.  
TIAN Wei, XIE Shunmeng, CHEN Yanping, et al. Comparative study on application of hybrid SiC IGBT device and Si IGBT device in rail transit[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(5): 67-72.
- [49] HAMADA K, HINO S, MIURA N, et al. 3.3 kV/1 500 A power modules for the world's first all-SiC traction inverter [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2015, 54(4S): 04DP07.
- [50] YASUI K, HAYAKAWA S, ISHIGAKI T, et al. A 3.3 kV 1 000 A high power density SiC power module with sintered copper die attach technology[C]/VDE. International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nuremberg: VDE, 2019: 1-6.
- [51] 郭淑英, 王征宇, 罗海辉, 等. 电动汽车 IGBT 的研究与应用[J]. 大功率变流技术, 2017(5): 29-35.  
GUO Shuying, WANG Zhengyu, LUO Haihui, et al. Research and application of IGBT in electric vehicle[J]. High Power Converter Technology, 2017(5): 29-35.
- [52] EICHER S, RAHIMO M, TSYPLAKOV E, et al. 4.5 kV press pack IGBT designed for ruggedness and reliability [C]/IEEE. Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. Seattle: IEEE, 2004: 1534-1539.
- [53] 刘国友, 窦泽春, 罗海辉, 等. 高功率密度 3 600 A/4 500 V 压接型 IGBT 研制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4855-4862.  
LIU Guoyou, DOU Zechun, LUO Haihui, et al. Development of high power density 3 600 A/4 500 V press-pack IGBT[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4855-4862.
- [54] 刘国友, 窦泽春, 罗海辉, 等. 压接型 IGBT 均流设计[J]. 中国电力, 2019, 52(9): 20-29.  
LIU Guoyou, DOU Zechun, LUO Haihui, et al. Current-sharing design of press-pack IGBT[J]. Electric Power, 2019, 52(9): 20-29.

收稿日期: 2023-02-01

修回日期: 2023-02-26