

电动汽车 IGBT 的研究与应用

郭淑英¹, 王征宇², 罗海辉³, 张旭辉², 吴义伯³, 覃荣震³

(1. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001; 2. 湖南中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007;
3. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 文章分析了电动汽车对 IGBT 器件的特殊要求, 总结了国内外知名厂商针对电动汽车 IGBT 芯片、模块封装的最新技术路线与研究现状, 同时介绍了国内外典型电动汽车 IGBT 产品的技术特点与应用情况; 展望了电动汽车用 IGBT 器件的未来发展趋势, 指出未来电动汽车用 IGBT 将向更高功率密度、更高工作结温、更高可靠性以及小型化、智能化、定制化的方向发展。

关键词: 电动汽车; IGBT 芯片; 封装技术; 应用前景

中图分类号: TN32

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2017)05-0029-07

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2017.05.004

Research and Application of IGBT in Electric Vehicle

GUO Shuying¹, WANG Zhengyu², LUO Haihui³, ZHANG Xuhui², WU Yibo³, QIN Rongzhen³

(1. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China; 2. Hunan CRRC Times Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412007, China; 3. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: This paper analyzed the special requirements of IGBT in electric vehicle, and summarized the latest technology roadmap and research status of the automotive IGBT chip technology and module interconnection of some well-known semiconductor manufacturers in the world. The technology characteristics and application of typical automotive IGBT module of different manufacturers were introduced. The development trends of automotive IGBT chip and module were prospected and it is found that more high power density, high junction temperature, high reliability and miniaturization, intelligence, customization are the development directions.

Keywords: electric vehicle; IGBT chip; packaging technology; application prospect

0 引言

目前中国已经成为全球电动汽车销量最大和增长速度最快的国家, 2016 年中国电动汽车产量超过 50 万辆。根据国务院发布的《节能与新能源汽车产业发展规划(2012-2020 年)》, 到 2020 年中国电动汽车生产能力将达到 200 万辆, 保有量将达到 500 万辆, 约占全球电动汽车总量的 40%~50%^[1]。电动汽车产业的快速发展为电机控制器、辅助电源(DC/AC、DC/DC、充电机)等关键零部件行业提供了良好的发展机遇, 同时也催生了对下游产业链中核心器件, 如对 IGBT 的

巨大需求。

在车载关键零部件中, 电机控制器将储能系统的直流电逆变为驱动电机所需要的三相交流电, 并根据车辆需求控制驱动电机, 为车辆提供驱动力; 同时在车辆制动时将动能转换为电能至储能系统, 是主要的能量转换机构。其不仅负荷重、控制精度要求高, 而且还要兼顾电动汽车的电压等级、功率等级、极限工况、工作环境、可靠性、功率密度、使用寿命、成本等要求。这些均对电动汽车 IGBT 芯片及模块的研制提出了挑战。

本文在分析国内外知名厂家各类 IGBT 模块的技术特征与应用情况的基础上, 指出了国内半导体行业的整体技术差距与努力方向, 预测了电动汽车用 IGBT 未来的发展趋势与研究热点。

收稿日期: 2017-09-07

作者简介: 郭淑英(1957-), 女, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电动汽车电机驱动系统、轨道交通牵引电机等。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0400403)

1 电动汽车用 IGBT 的特点

电动汽车涵盖了乘用车、商用车、物流车及其他专用车辆领域，其驱动系统包括纯电动、混合动力和燃料电池动力等模式。表 1 列出了电动汽车对电机控制器及其 IGBT 模块的一般性要求。与工业应用相比，电动汽车对电机驱动系统的功率密度、驱动效率及高效区范围等要求更高，同时还存在以下技术难点^[2]：

- (1) 车辆运行时，特别是在城市内行驶时频繁启停，此时控制器中 IGBT 模块工作电流随之升降，电流的这种快速变化会导致 IGBT 结温的快速变化；车辆长时间停靠后重新运行时也会引起 IGBT 壳温的变化。这些因素都会影响 IGBT 的使用寿命。
- (2) 采用永磁同步电机驱动的电动汽车启动、驻坡时，电机工作在近似堵转工况，此时电机控制器中部分 IGBT 芯片持续承受大电流，会造成模块的局部过热，为散热设计带来了挑战。

(3) 由于道路的复杂性，汽车级 IGBT 模块在车辆行驶中会受到较大的振动和冲击（加速度通常在 10g 以上），因此对于模块各引线端子的机械强度要求较高。

(4) 有限的车载空间对电机控制器、IGBT 模块的功率密度提出了更高要求。

国内外知名的半导体厂商，如英飞凌、富士、株洲中车时代电气股份有限公司（简称“中车时代电气”）等企业均已经开发出了适合电动汽车应用的 IGBT 芯片与模块。在前几代产品研发中，各企业通常采用传统的技术路线，如通用 IGBT 芯片、平面基板与直接键合铜绝缘衬板的三明治结构、真空回流焊接和引线键合技术等，但这已经很难满足电动汽车电机控制器更高的散热性能、电气性能和可靠性能等方面的要求。因此亟需对包括半导体材料、芯片、封装互连、辅助材料体系在内整个产业链条的技术提升。

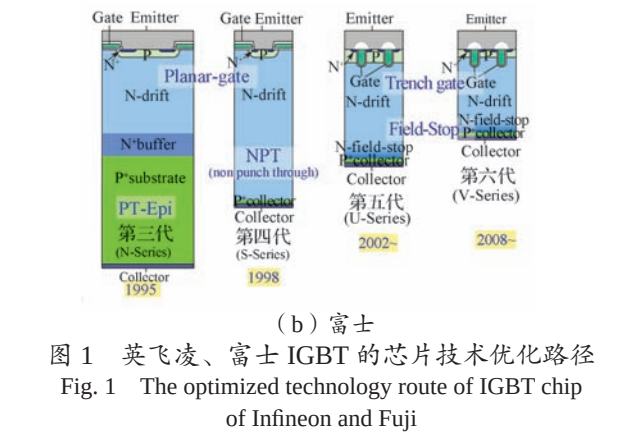
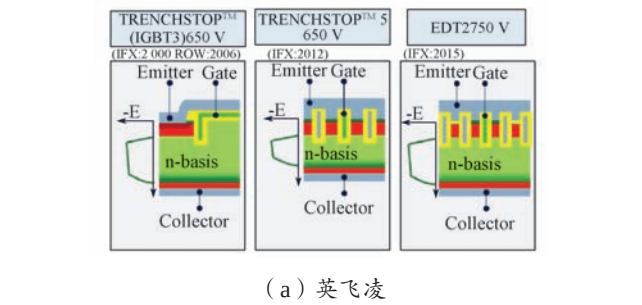
表 1 电动汽车电机控制器、IGBT 模块的部分参数
Tab. 1 Part parameters of inverter and IGBT module in electric vehicle

应用要求	电机控制器	IGBT 模块
海拔	≥ 4 000 m	≥ 4 000 m
环境温度	纯电动：-40℃~85℃；混合动力：-40℃~105℃	结温 ≥ 175℃
振动范围	≥ 10g	≥ 10g
寿命	乘用车：≥ 10 年，24 万 km； 商用车：≥ 8 年，60 万 km	温度循环：25℃~105℃，≥ 20 000 次；同等条件下工业级：5 000 次 功率循环：ΔT _j =60 K，T _{jmax} =150℃，≥ 150 000 次； 工业级：ΔT _j =60 K，T _{jmax} =125℃，125 000 次
功率密度	≥ 17 kW/L；	汽车级 IGBT 或定制模块
效率	≥ 98 %	—
功率等级	额定 30 kW~135 kW；峰值：55 kW~220 kW	300 A~820 A
电压等级	直流电压 384 V~540 V	650 V~1 200 V
频率	—	4 kHz~10 kHz

2 电动汽车用 IGBT 芯片与模块研究现状

2.1 IGBT 芯片技术

针对电动汽车运行工况的需求，电动汽车 IGBT 芯片正朝着小型化、低损耗、耐高温、更高安全性以及智能化方向发展。目前国外先进企业如英飞凌^[3-5]、富士^[6-7]、三菱^[8-9]等均开发了新一代电动汽车 IGBT 芯片。图 1 描述了英飞凌、富士 IGBT 芯片优化的技术路径。



国内电动汽车 IGBT 芯片技术起步较晚，且受限于基础工艺与生产条件，技术发展较慢。目前，一些厂家与研究机构开展了电动汽车 IGBT 芯片研发及测评方法的研究。其中，中车时代电气已开发出 1 700 V~6 500 V 系列 IGBT 产品并在轨道交通、智能电网等领域实现批

量应用。在此基础上开发了 T5 代适合电动汽车应用的 750 V/200 A、1 200 V/200 A 以及 750 V/300 A 规格双面可焊的高性能沟槽栅 IGBT 芯片。同时正在研发 T6 代新型 IGBT 芯片,其技术特点是: 精细沟槽结构、逆导型、传感器集成、双面焊接等,其有望对标国外最新一代电动汽车 IGBT 产品。图 2 为中车时代电气 IGBT 芯片的技术优化路线。其他一些国内的半导体公司如比亚迪,也开发出了电动汽车 IGBT 芯片与模块,并实现了装车应用。

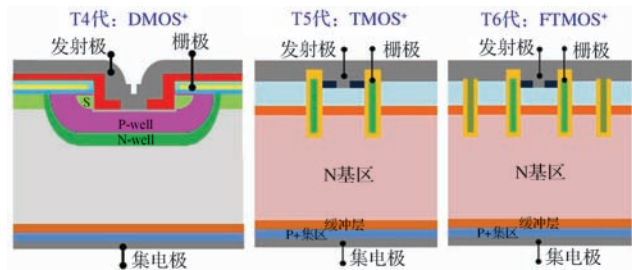


图 2 中车时代电气 IGBT 芯片的技术优化路线
Fig. 2 The optimized technology route of IGBT chip of CRRC

表 2 对比了国内外几家公司新一代产品的工艺路线与关键指标。可以看出,这些企业技术储备雄厚、技术水平相当,针对电动汽车需求采用了不同的工艺方法开展优化设计,新产品的关键指标比上代产品均有较大提升。

表 2 国内外不同厂家 IGBT 芯片的技术特征
Tab. 2 The characteristics of IGBT chip of different manufacturers in the world

公司	产品类型	技术特点	性能提升
英飞凌	EDT2	精细沟槽技术	电流密度提升 30%
		优化截止层	耐压提升 15%
		双面焊接 (形成 Ni+Pd 金属层)	适合银烧结,提升散热性能,提升可靠性
富士	第七代芯片	沟槽栅及 RC-IGBT 技术	体积减少 30%, 功耗降低 20%
三菱	第七代芯片	优化元胞设计与背面浓度设计	$V_{CE(sat)}$ 降低 13%, E_{off} 降低 14%
		集成温度、电流传感器	具有信号探测功能
		增强型沟槽栅 (TMOS ⁺) 技术	低导通压降、宽安全工作区特性; 与 IGBT4 相比 $V_{CE(sat)}$ 低约 10%

2.2 IGBT 模块封装技术

IGBT 模块的封装技术是实现电动汽车电机控制器高温运行、高可靠性、高功率密度的关键环节,涉及到芯片表面互连、贴片互连、导电端子引出互连等相关工艺。目前 IGBT 模块封装的研究主要集中在新型互连材料、互连方式以及相关工艺参数优化等方面,旨在增强模块散热能力、减小体积并提高可靠性。

2.2.1 芯片表面互连技术

IGBT 模块内部常用引线键合的方法将芯片与芯片、

芯片与绝缘衬板表面金属化层、半导体绝缘衬板之间以及绝缘衬板与功率端子之间进行电气互连。

常用的键合线有铝线和铜线两种 (图 3), 其中铝线键合工艺成熟、成本较低,以英飞凌公司为例,其 Econodual、PrimePACK 系列产品均采用这种工艺。但是铝线键合的电气、热力学性能较差,膨胀系数失配大,影响 IGBT 使用寿命。而铜线键合工艺具有电气、热力学性能优良等优点,可靠性高,适用于高功率密度、高效散热的模块,已经应用在汽车级 Econodual, 1 800 A PrimePACK 产品中。铜线键合工艺的难点是需要对芯片表面进行铜金属化处理,同时需要更高的超声能量,这有可能伤及 IGBT 芯片。

引线键合技术相对工艺简单、成本低廉;但也存在缺点,如多根引线并联的邻近效应会引起电流分布不均,寄生电感较大会造成较高的关断过电压,金属引线和半导体芯片之间热膨胀失配会产生热应力,从而影响使用寿命等。为了规避这些缺点,研究人员开发出其他新型芯片表面互连技术,如图 4 所示的直接电极引出^[10]、柔性电路板键合^[11-12]等。直接电极引出工艺是采用金属板或箔结构将芯片发射极连接在一起,直接引出形成外接端子,但是门极仍采用键合线互连或单独连接。而柔性电路板键合用 PCB 同时互连发射极、门极、控制电极等辅助端子,可靠性更高。

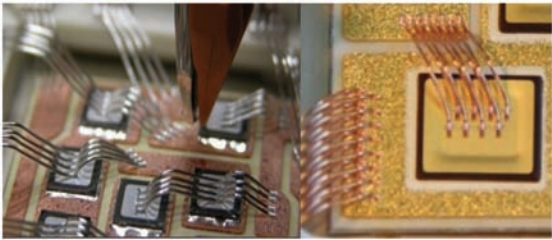


图 3 铝线、铜线键合技术
Fig. 3 The aluminium and copper wire used in wire bonding

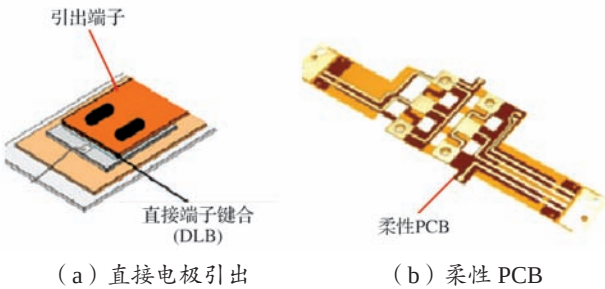


图 4 IGBT 芯片其他表面互连技术
Fig. 4 The other interconnects on chip surface

2.2.2 贴片互连技术

贴片互连是指将芯片下表面与绝缘衬板焊接在一起的互连工艺。软钎焊接是常用的贴片焊接工艺,采用焊膏或焊片作为焊料、真空回流焊接工艺,优点是工艺简

单、成本较低^[13]。英飞凌的 Econodual、PrimePACK 系列、富士的 M651/652 系列产品均采用这种焊接工艺。

采用软钎焊工艺的焊接层熔点在 220 ℃ 左右,而混合动力电动汽车中 IGBT 芯片可能工作在 175 ℃,焊接层热负荷过重、模块可靠性低。为此业界开发出了低温银烧结贴片互联工艺^[14],焊料采用纳米或微米级银颗粒,焊接压强在 200 ℃~300 ℃ 时保持 30 MPa~50 MPa,焊接时间 60 s~180 s。采用这种工艺的焊接层具有高热导率、高电导率、高可靠性的优点,赛米控的 SKiM 系列即采用该工艺。低温银烧结贴片互联工艺的缺点是工艺实施过程中需要施加高温、高压,材料成本较高,且对设备与工装均提出了较高要求。

2.2.3 端子引出技术

电动汽车用 IGBT 模块的功率导电端子需要承载数百安培的大电流,对电导率和热导率有较高的要求,车载环境中还要承受一定的振动和冲击力,机械强度要求高。因此,采用传统焊接工艺的导电端子已难以满足其大电流冲击、热循环作用和机械振动等严苛工况的要求。

金属超声键合是一种适合电动汽车 IGBT 导电端子焊接的工艺^[15]。它采用高频超声能量使金属原子在两种材料界面间相互扩散,最终形成一种高强度键合界面。该工艺简单快捷,接触电阻较低,键合强度较高。

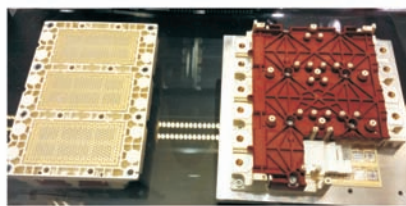
2.2.4 散热结构设计

早期电动汽车用 IGBT 通常采用带铜基板的三明治结构,芯片工作中产生的热量流经各导热层,最终经导热硅脂传递给水冷系统。这种结构工艺简单成熟,但是热阻大、散热性能差、结构笨重。

目前国内外半导体厂商已开发出性能更优越的新型散热结构。图 5 (a) 示出中车时代电气研制的带有 Pin-Fin 散热结构的模块产品^[16],其采用集成针翅基板直接接触冷却液的冷却方式,散热系统结构简单、散热性能好;缺点是成本较高、工艺难度大。赛米控公司的 SKiM 模块采用无基板和无焊接结构(图 5 (b)),芯片通过银烧结技术与绝缘衬板结合,体积小、重量轻^[17]。而丰田雷克萨斯 LS600 中的定制化模块(图 6)采用平



(a) 中车时代电气的直接液体冷却功率模块



(b) 赛米控的无基板无焊接模块

图 5 新型 IGBT 模块散热结构
Fig. 5 Novel radiation structure for IGBT module

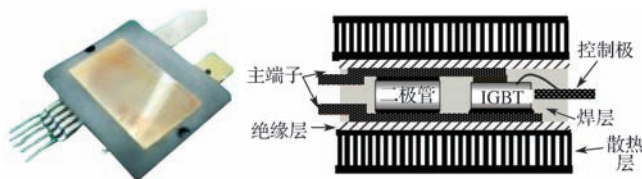


图 6 雷克萨斯 LS600 功率模块及其封装截面示意图
Fig. 6 The IGBT module of LEXUS LS600 and its schematic cross section

面互连和双面冷却技术,两块铜板直接与芯片的上下表面相焊接,整体热阻大幅下降,但是需要在两个电极与外部散热器之间加绝缘层^[18]。

上述电动汽车 IGBT 模块封装技术均直接影响产品可靠性,以铜线键合、银烧结工艺、直接电极引出、双面焊接为代表的先进封装技术是下一代电动汽车 IGBT 模块的发展方向^[19]。

3 电动汽车 IGBT 模块应用现状

3.1 国外电动汽车 IGBT 模块与应用

国际主流的电动汽车 IGBT 模块生产厂家,如英飞凌、富士电机、三菱电机、赛米控、博世、电装等,均成功推出了系列化产品,并在电动汽车上得到较为广泛的应用。

英飞凌基于 IGBT3 和 IGBT4 芯片已经推出了适合混合动力汽车的 Hybrid PACK 系列产品,该系列产品在国内外均拥有广泛的应用,包括宝马新能源以及国内的中车时代电动、精进电机、上海电驱动、比亚迪、大郡、汇川等电控部件厂家。另外英飞凌还开发出了可用于重型卡车、客车的 Econodual(图 7)、PrimePACK 系列模块。2015 年英飞凌推出了基于 IGBT5 芯片的 Prime PACK 模块。2016 年推出基于 EDT2 芯片的 HP Drive 模块,同样性能条件下体积比 HP2 小 30%。

富士电机基于第 7 代 IGBT 芯片的 M651/652 系列模块内部集成了温度传感器和电流传感器;近期它又推出了基于逆导型 IGBT 芯片的 M653 模块产品(图 8),该产品采用集成式一体化水冷针翅铜基板散热器进行直接液体冷却,热阻可减小 30%,体积减小 40%,适用

于 80 kW~120 kW 电机驱动系统。富士电机的 IGBT 模块已经应用于丰田公司部分车型，国内的大郡、汇川、中车时代电动等电机控制器厂家也有部分应用。

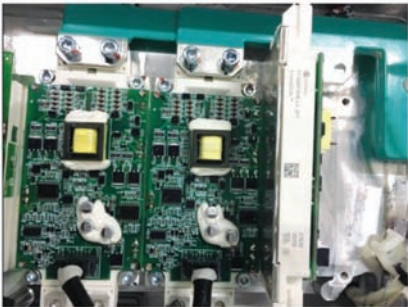


图 7 英飞凌 Econodual IGBT 模块的应用
Fig. 7 Econodual IGBT module of Infineon in inverter

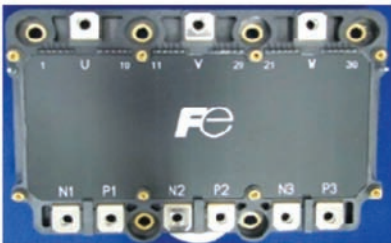


图 8 富士 M652/653 系列 IGBT 模块
Fig. 8 M652/653IGBT module of Fuji

三菱电机开发了机械性能好、结构紧凑、封装成本低的转模半桥功率模块(图 9),包括 650 V/ 300 A(600 A)与 1 200 V/300 A 等不同规格,已经成功应用到本田、丰田的电动汽车中。

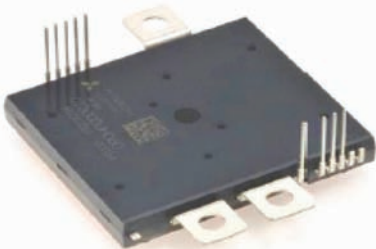


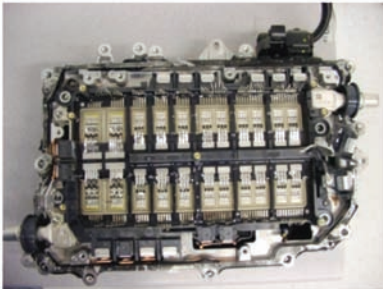
图 9 三菱 J-TPM 系列 IGBT 模块
Fig. 9 J-TPM IGBT module of Mitsubishi

赛米控基于无基板焊接工艺研制的 SKiM 模块采用了第三代或第四代沟槽 IGBT3/4 芯片,模块额定电压 600 V~1 200 V、电流等级 300 A~900 A,最高工作结温可达 175 ℃,功率等级 20 kW~150 kW。

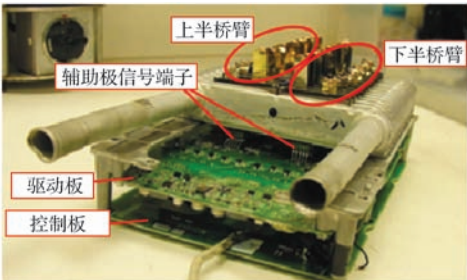
博世开发了 650 V/300 A (600 A) 的平面型转模模块,具有体积小、散热效率高、可靠性高等优点,工作结温 -40 ℃ ~150 ℃,主要应用于 60 kW~100 kW 的电机控制器上。

电装采用无基板、铝带键合工艺定制开发的电动汽车 IGBT 模块已经在丰田 Prius 混合动力汽车中成熟应

用(图 10 (a)) ; 同时还定制开发了平面型转模模块,并基于平面键合技术实现了双面散热功能,已经批量应用于丰田 LS600 电机控制器中(图 10 (b)) 。



(a) Prius 2010



(b) LS600

图 10 丰田汽车采用的 IGBT 模块
Fig. 10 The IGBT module used in Toyota' EVs

3.2 国内电动汽车 IGBT 模块与应用

目前,我国具备电动汽车 IGBT 芯片研制与模块封装测试能力的厂家主要有中车时代电气、比亚迪、嘉兴斯达等;其他的企业,如宏微、银茂、国扬等主要通过外购 IGBT 芯片,进行标准模块封装。

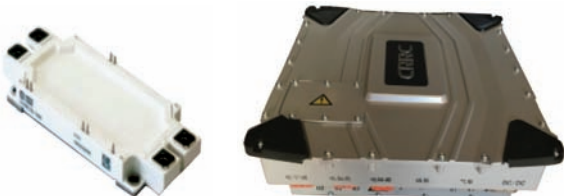
嘉兴斯达在上海建成了电动汽车 IGBT 模块封装生产线,已研发出 600 V~1 700 V 规格的 IGBT 模块,并进行了小批量试装。比亚迪也开发出了 1 200 V/400 A 电动汽车 IGBT 模块,并在本公司的电动汽车上批量应用。

中车时代电气采用标准钎焊及烧结技术、铜线键合、母排超声键合等封装技术,开发出 1 200 V /600 A、750 V/ 600 A (800 A) 等多个规格的电动汽车 IGBT 模块。表 3 对比了基于中车时代电气自主研发芯片封装的电动汽车 IGBT 模块与英飞凌 Econodual 量产 1 200 V/ 600 A 电动汽车 IGBT 模块的关键参数。可以看出,该 IGBT 模块的综合性能与国外产品相当,部分性能如 IGBT 的饱和压降 $V_{CE(sat)}$ 以及 FRD 的导通压降 V_F 均优于国外产品。

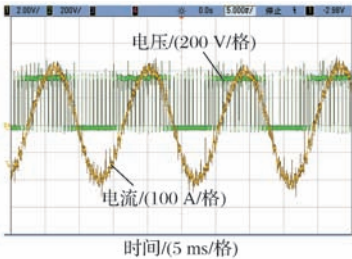
图 11 中,中车时代电气开发的 1 200 V /600 A 电动汽车 IGBT 模块已经实现小批量装车试运行,截止目前平均单台车累计运行近 4 万 km,运行情况良好。

表3 中车时代电气与英飞凌 Econodual 量产 IGBT 模块的关键参数对比
Tab. 3 The comparison of key parameters of IGBT module between CRRC and foreign competitors

生产商	器件位置	$V_{CE(sat)}/V$		V_F/V		E_{ON}/mJ	E_{OFF}/mJ	E_{REC}/mJ
		$I_C=600\text{ A}, 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$I_C=600\text{ A}, 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	$I_F=600\text{ A}, 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$I_F=600\text{ A}, 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	$V_{CC}=600\text{ V}, I_C=600\text{ A},$ $R_{G(ON)}=R_{G(OFF)}=1.5\text{ }\Omega, 150\text{ }^{\circ}\text{C}$		
中车时代电气	上桥臂	2.01	2.50	2.01	2.34	25	115	26
	下桥臂	2.02	2.52	1.97	2.31	24	120	23
英飞凌 Econodual	上桥臂	2.26	2.85	2.28	2.46	20	97	27
	下桥臂	2.36	3.00	2.42	2.63	23	96	20



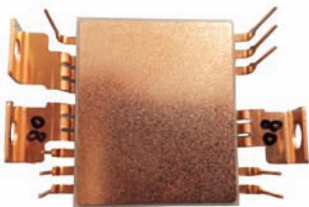
(a) IGBT 模块 (b) 电机控制器



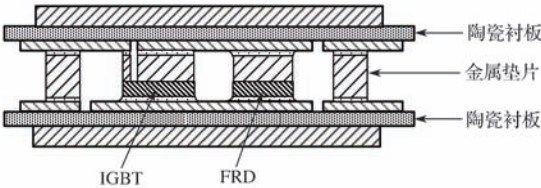
(c) 电机控制器的工作波形

图 11 中车时代电气开发的电动汽车 IGBT 模块与应用
Fig. 11 Automotive IGBT module of CRRC and its application

同时，中车时代电气还基于 T5 代 IGBT 芯片，采用平面封装、双面焊接、端子超声波键合、门极铝线键合等工艺研制出了 750 V/600 A 规格、具有双面冷却功能的半桥 IGBT 模块，功率等级 85 kW（图 12）。这种新型 IGBT 模块具有结构紧凑、寄生电感小、散热性能优越的特点，适用于纯电动及混合动力汽车驱动系统^[20]。



(a) 产品外观图



(b) 产品结构示意图

图 12 中车时代电气的平面封装双面冷却电动汽车模块
Fig. 12 High power compact automotive IGBT module with planar packaging technology of CRRC

综上，国内电动汽车模块封装尚处于研发的跟踪阶段，标准模块设计主要参考国际先进的标准模块技术参

数；而在材料先进性、工艺水平、制造平台、测试能力等方面均有待提高。随着国内新能源汽车产业的快速发展，国产 IGBT 芯片及模块技术不断提升，用量持续扩大，价格优势也将会逐步显现。

4 电动汽车 IGBT 芯片与模块的研究方向

未来电动汽车 IGBT 依然是向更高功率密度、更高工作结温、更高可靠性以及小型化、智能化、定制化的方向发展。未来的芯片技术的研究内容主要包括：沟槽精度从微米向亚微米、深亚微米发展^[21]，从而进一步提升芯片功率密度；在芯片内部集成温度传感器、电流传感器^[22]实现芯片级参数的实时监控；为了进一步缩小封装尺寸并提高功率密度，将 FRD 芯片集成到 IGBT 内部，形成逆导 IGBT 结构^[23]。模块封装中涉及到的关键封装材料技术^[24]、双面焊接技术^[25]、低温银烧结技术^[26]、无引线芯片表面键合技术^[27]以及集成式散热技术^[28]等依然是未来的研究热点。

此外，传统 Si 基 IGBT 的性能如电场强度、频率、热性能等潜力已经接近极限，具有优越的高温、高效、高频特性的宽禁带半导体器件如 SiC 基 MOSFET 已成为电动汽车领域的选择方向之一^[29-30]。科锐、罗姆以及国内的中车时代电气、中科院微电子所等研究单位，均已开展提升 MOSFET 芯片电流等级、可靠性水平的研究；同时为了能够充分发挥 SiC 器件的高温、高速优势，还开展了新型互连方式、冷却方式、封装工艺、封装材料等方面的研究。预期采用 SiC 基 MOSFET 器件的电动汽车电机控制器功率密度将超过 30 kW/L；而充分利用 SiC 基 MOSFET 的高频特性提升车载 DC/DC 功率密度的研究也正在开展。

另外，随着电动汽车市场的快速发展，有必要构建我国电动汽车 IGBT 的应用、可靠性与寿命评测标准体系，引导电动汽车 IGBT 产业的良性、有序发展。

5 结语

本文对比了国内外知名厂家电动汽车 IGBT 芯片与模块封装的技术路线与研究现状，分析了国内外典型

电动汽车 IGBT 模块性能特征及应用情况。可以看出, 电动汽车 IGBT 芯片与模块封装技术的研发始终要围绕电动汽车电机控制器高温、高效、高可靠性、高功率密度的要求而开展, 而新型半导体材料器件, 如 SiC 基 MOSFET 将是未来电动汽车电机控制器的重要选择之一。

参考文献:

- [1] 杨国丰, 周庆凡, 侯明扬, 等. 中国电动汽车发展前景预测与分析 [J]. 国际石油经济, 2017, 25(6): 59–65.
YANG G F, ZHOU Q F, HOU M Y, et al. Analysis of China's electric vehicles and its prospect [J]. International Petroleum Economics, 2017, 25(4): 59–65.
- [2] 何耀华. 汽车级 IGBT 在混合动力车中的应用 [J]. 电子产品世界, 2010(3): 53–55.
- [3] GEINZER T, SCHWARZ A, GLEICH M, et al. Innovations for IGBT based Power Modules in HEV Drivetrain Applications [C] // PCIM 2017. Nuremberg, Germany: 1811–1813.
- [4] GEINZER T, BOEVING H, REITER T, et al. Value creation developing efficient 750 V IGBT and emitter controlled diode for automotive applications [C] // PCIM, Nuremberg, Germany, 2015: 1638–1641.
- [5] 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] // ISPSD, 2015: 105–108.
- [6] HIGUCHI K, KOYAMA T, KITAMURA A, et al. New standard 800 A/750 V IGBT module technology for automotive applications [C] // PCIM, 2015: 1137–1144.
- [7] SAWADA M, OHI K, IKURA Y, et al. Trench Shielded Gate Concept for Improved Switching Performance with the Low Miller Capacitance [C] // ISPSD, 2016: 207–210.
- [8] NAKATA Y, ISHIHARA M, MIYAMATO N, et al. High performance 7th generation chip installed power module for EV/HEV inverters [C] // PCIM, 2015: 1462–1467.
- [9] KAMIBABA R, KONISHI K, FUKADA Y, et al. Next Generation 650 V CSTBTM with improved SOA fabricated by an Advanced Thin Wafer Technology [C] // ISPSD, 2015: 29–32.
- [10] ISHIHARA M, MIYAMOTO N, HIYAMA K, et al. New compact-package power modules for electric and hybrid vehicles(J1-Series) [C] // PCIM, 2014: 1093–1097.
- [11] GRABHOFF T. SKiN technology for ultra compact power modules [J]. Bodo's power systems, 2012 (9): 28–30.
- [12] SCHEUERMANN U. Reliability of planar SKiN interconnect technology [C] // CIPS, 2012: 464–471.
- [13] GUTH K, HILLE F, UMBACH F, et al. New assembly and interconnects beyond sintering methods [C] // PCIM, 2010: 232–237.
- [14] WU Y B, ZHAO Y M, STEVE J, et al. Applications of low temperature sintering technology as die attach for high temperature power modules [C] // IEEE International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT 2014), 2014: 452–457.
- [15] NISHIMURA Y, KIDO K, MOMOSE F, et al. Development of Ultrasonic Welding for IGBT Module Structure [C] // Proc. of 22nd Int. Symp. Power Semiconductor Devices & ICs (ISPSD), 2010: 293–296.
- [16] REEVES M, MORENO J, BEUCHER P, et al. Pushing the limits of liquid cooling: Design and analysis of a direct liquid cooling system for power modules [C] // PCIM Europe 2012. Berlin and Offenbach: VDE, 2012: 519–524.
- [17] SKiM 63/93 IGBT Modules, Technical Explanation [EB/OL]. (2013-10) [2017-08-01]. <https://www.semikron.com/dl/service-support>.
- [18] LIANG Z. Status and trend of automotive power packaging [C] // 24th Intern. Symposium on Power Semiconductor Device & ICs (ISPSD), 2012: 325–331.
- [19] 徐凝华, 吴义伯, 刘国友, 等. 混合动力 / 电动汽车用 IGBT 功率模块的最新封装技术 [J]. 大功率变流技术, 2013(1): 1–6.
XU N H, WU Y B, LIU G Y, et al. The Latest Packing Technology for IGBT Module in HEV/EV Application [J]. High Power Converter Technology, 2013(1): 1–6.
- [20] WANG Y G, LI Y, WU Y B. High Power Compact Automotive IGBT Module with Planar Packaging Technology [C] // PCIM Asia 2017, 2017: 255–259.
- [21] DEVINY I, LUO H H, XIAO Q, et al. A Novel 1 700 V RET-IGBT (Recessed Emitter Trench IGBT) Shows Record Low VCE(ON), Enhanced Current Handling Capability and Short Circuit Robustness [C] // 29th Intern. Symposium on Power Semiconductor Device & ICs (ISPSD), 2017: 147–150.
- [22] BIDOUCHE B E B, AVENAS Y, ESSAKILI M, et al. Thermal characterization of an IGBT power module with on-die temperature sensor [C] // 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Tampa, FL, 2017: 2317–2322.
- [23] RUTHING H, HILLE F, NIEDERNOSTHEIDE F J, et al. 600V Reverse Conducting (RC)-IGBT for Drives Applications in Ultra-Thin Wafer Technology [C] // 19th Intern. Symposium on Power Semiconductor Device & ICs (ISPSD), 2007: 89–92.
- [24] VANLATHAM E, ENAMI H, HYUN D S. New generation of silicone gels for power devices encapsulation [C] // PCIM Europe 2012. Berlin and Offenbach: VDE, 2012: 686–693.
- [25] GUTH K, OESCHLER N, BOEWER L, et al. New assembly and interconnects for power modules [C] // CIPS, 2012: 380–384.
- [26] SAKAMOTO S, SUGANUMA K. Thermo Mechanical Reliability of Low temperature Low-pressure Die Bonding Using Thin Ag Flake Pastes [C] // CIPS 2012. Berlin and Offenbach: VDE, 2012: 457–458.
- [27] MOUAWAD B, BUTTAY C, SOUEIDAN M, et al. 3-Dimensional, Solder-Free Interconnect Technology for High-Performance Power Modules [C] // CIPS 2012. Berlin and Offenbach: VDE, 2012: 433–438.
- [28] WANG Y G, JONES S, DAI X P, et al. Reliability enhancement by integrated liquid cooling in power IGBT modules for hybrid and electric vehicles [J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(9–10): 1911–1915.
- [29] EVANS T, HANADA T, NAKANO Y, et al. Development of SiC Power Devices and Modules for Automotive Motor Drive Use [C] // IEEE International Meeting for Future of Electron Devices (IMFEDK), 2013: 116–117.
- [30] HAMADA K, NAGAO M, AJIOKA M, et al. SiC-Emerging Power Device Technology for Next-Generation Electrically Powered Environmentally Friendly Vehicles [J]. IEEE Trans. Electron Devices, 2015, 62(2): 278–285.