

电动汽车功率模块平面封装技术

王彦刚^{1,2}, 刘涓瑜³, 戴小平^{1,2}, 吴义伯^{1,2}, 彭勇殿^{1,2}, 刘国友^{1,2}

(1. 新型功率半导体器件国家重点实验室, 湖南 株洲 412001;

2. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001; 3. 曼彻斯特大学 电气与电子工程学院, 英国 曼彻斯特 M13 9PL)

摘要: 讨论了目前电动汽车用功率模块典型的平面封装技术; 介绍了汽车功率系统对功率模块的性能要求, 以及汽车模块封装面临的挑战和应对措施; 讨论了当前典型的采用平面封装技术的电动汽车功率模块, 分析其结构和封装技术等; 并展望了汽车级平面模块封装技术的下一步发展方向。

关键词: 混合及纯电动汽车; IGBT 模块; 平面封装技术; 功率控制单元; 可靠性

中图分类号: TN303; U469.72

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2017)05-0036-06

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2017.05.005

Planar Packaging Technology of Power Semiconductor Module for Electric Vehicle

WANG Yangang^{1,2}, LIU Xuyu³, DAI Xiaoping^{1,2}, WU Yibo^{1,2}, PENG Yongdian^{1,2}, LIU Guoyou^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Power Semiconductor Devices, Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

3. School of Electrical and Electronic Engineering, The University of Manchester, Manchester M13 9PL, United Kingdom)

Abstract: In this paper, the typical planar packaging technologies of HEV/EV power semiconductor module were presented. Firstly, the functionality and performance requirements for power module by automotive power system, as well as the challenges and mitigation strategy of automotive power module packaging, were discussed. The typical state-of-the-art HEV/EV modules assembled by planar technology were reviewed and analyzed in terms of the structure and packaging technologies. Finally, the outlook of next generation key packaging technologies of planar automotive module was proposed.

Keywords: hybrid and electric vehicle; IGBT module; planar packaging technology; power control unit; reliability

0 引言

混合和纯电动汽车 (hybrid and electric vehicles, HEV/EV) 是部分或全部由电力驱动的车辆, 其电力能源可以由可再生和清洁能源, 如太阳能、风电及核能等转化。据统计, 目前全球有 16% 左右的 CO₂ 排放直接来自于汽车^[1]。由于可以大幅减少 CO₂ 排放和降低噪声污染, HEV/EV 被普遍认为是对环境非常有益的产品, 对缓解全球能源危机和环境恶化具有重要作用^[2-3]。因此, 世界各国政府都在鼓励和支持 HEV/EV 的推广和普及, 各大传统汽车企业和新型低碳汽车企业正积极开

发性能更高和价格更低的电动汽车产品。

功率控制单元 (power control unit, PCU) 是 HEV/EV 动力系统的核心部分, 在很大程度上决定了系统和整车的性能。功率半导体模块是汽车 PCU 的最核心部件, 通过控制电力转换, 实现 HEV/EV 电动马达的驱动、控制以及制动能量回收, 因此功率半导体模块对 HEV/EV 的性能、效率、可靠性、成本等有很大的影响^[4-10]。

目前, 汽车功率模块的主流半导体器件是绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 和相应的续流二极管 (freewheeling diode, FWD)。由于电动汽车在性能、安全性和成本等方面有更高的要求, 汽车级功率模块产品的测试和验证标准都高于工业级和牵引级产品的^[4,6,11]。目前, 不同厂商已经推出了一系列先进的汽车级功率 IGBT 模块产品, 如直接液体冷却 (direct

收稿日期: 2017-08-12

作者简介: 王彦刚 (1974-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事新型功率半导体模块的设计、封装、应用及可靠性分析等工作。

基金项目: Innovate UK 项目 (102287)

liquid cooling, DLC) 模块^[11-12]、无衬板烧结模块^[13]、平面转模(planar transfer mold, PTM) 模块^[14]、直接端子键合(direct lead bonding, DLB) 模块^[15]、双面冷却(double side cooling, DSC) 模块^[16-18]等, 但为了满足汽车系统不断增长的功率密度、开关频率、转换效率、可靠性、重量、体积和成本等方面的严格要求, 功率半导体企业仍然面临着一系列器件及封装方面的困难和挑战。

本文主要讨论目前电动汽车 IGBT 功率模块典型的平面封装技术和产品, 汽车模块封装面临的挑战和应对措施; 然后分析了采用平面封装技术的电动汽车功率模块的结构和封装技术, 并总结了汽车级模块平面封装技术的发展趋势。

1 汽车级功率模块面临的技术挑战及解决方案

由于受汽车空间、重量和成本的限制, 功率模块和逆变器系统必须尽可能地减轻重量、采用紧凑的封装结构并减少成本; 同时, 汽车 IGBT 模块一般工作在高温、高湿、高机械振动和冲击以及可能存在化学污染等非常严酷的环境中, 其可靠性要求和验证标准必须更加严格, 以满足电动汽车的使用要求^[4]。

根据美国汽车研究委员会的汽车功率系统发展目标, 到 2020 年, 汽车功率系统的冷却温度将达到 105℃, 而成本和功率密度将比 2010 年的分别降低 60% 和提高 50% 左右(表 1)。通过与发动机系统共用高温冷却液, 电动汽车功率模块的体积、重量和成本可以相应降低。然而, 提高功率密度后, 系统的冷却效率必须相应提高, 以达到快速有效地将功率半导体器件产生的热量散发出去的效果; 同时, 也要求功率器件能够在较高的温度下工作并产生较少的功率损耗。

表 1 电动汽车功率系统发展目标
Tab. 1 Technology development targets of EV power electronics system

年份	成本 / \$·kW ⁻¹	质量功率密度 / kW·kg ⁻¹	体积功率密度 / kW·L ⁻¹	冷却温度 / ℃
2010	7.9 (1)	10.8 (1)	8.7	90
2015	5.0 (-37%)	12.0 (+11%)	12.0 (+38%)	105
2020	3.3 (-58%)	14.1 (+31%)	13.4 (+54%)	105

如表 2 所示, 目前汽车功率模块封装面临着一系列电学、热学、机械及可靠性方面的挑战。其相应的解决方案主要从两方面入手: 功率半导体器件和模块封装。通过优化器件设计和制造工艺, 功率模块的电学参数、功率密度、开关频率、功率损耗和最大结温可以在一定程度上得到改善和提高; 然而, 由于功率模块的性能和可靠性受封装技术的限制, 先进的器件并不能保证功率模块和系统的优越性能, 需配合先进的封装结构和技术

才可以解决表 2 中大部分问题。表 3 从封装结构和技术出发, 总结了应对汽车模块挑战的主要解决方案。可以发现平面封装技术是最有利于提高汽车功率模块性能和可靠性的先进技术, 可以在很大程度上应对目前汽车模块所面临的技术挑战^[19]。

表 2 汽车功率模块封装面临的挑战
Tab. 2 Challenges of automotive power module packaging

电学	高功率密度、高开关速度(f_{sw})、低功率损耗、低寄生参数、大的反偏安全工作区和短路安全工作区
热学	高工作温度(T_{jop})、高最大结温(T_{jmax})、低结壳热阻($R_{th J-C}$)、匹配材料 CTE
机械	抗机械振动和冲击能力强、体积小、重量轻
可靠性	高电学、热学和机械可靠性、高功率循环可靠性

表 3 汽车功率模块封装解决方案
Tab. 3 Solutions to challenges of HEV/EV power module packaging

功率模块技术	电学性能	热学性能	可靠性和寿命	机械稳定性	体积重量
直接液体散热		√	√		√
平面封装技术	√	√	√	√	√
超声焊接		√	√	√	
压力接触			√	√	
双面冷却	√	√	√		√
注塑和转模外壳			√	√	

2 平面封装汽车功率模块

传统功率模块通过铝键合引线实现芯片表面互连以及衬板之间的互连。引线 with 芯片的键合点面积较小, 芯片工作中产生的热量主要向下扩散, 而且键合点在功率循环过程中温度较高, 容易发生失效, 被认为是功率模块可靠性最薄弱的环节之一。

平面封装功率模块的主要特点是采用平面金属层替代传统的芯片表面的铝键合引线互连结构。这种结构可以实现芯片上表面散热, 降低电学寄生参数, 提高载流能力, 具有一系列电学、热学、机械及可靠性方面的优点^[14-18]:

- (1) 芯片的功率损耗可以部分通过模块上面散发出去, 增加散热效率, 降低热阻, 使芯片表面温度分布均匀, 消除过热点, 提高了长期可靠性。
- (2) 通过减小寄生电学参数, 降低过冲电压, 增加安全工作区, 提高效率, 减轻开关振荡。
- (3) 通过去除键合引线, 减少功率模块的可靠性弱点, 提高功率循环寿命。

下面分别介绍和分析几种采用不同结构和技术的面封装电动汽车功率模块。

2.1 平面封装双面冷却汽车模块

通过平面封装技术，可以实现将功率模块产生的热量损耗通过上下两个方向的散热器扩散，达到双面冷却 (DSC) 的效果；而传统引线键合结构的功率模块，芯片表面不能直接与散热器接触。理论上讲，DSC 结构可以将模块的散热效率提高一倍，结壳热阻 ($R_{th J-C}$) 降低一半左右，从而大大降低芯片结温 (T_j)，提高热性能和温度可靠性。

图 1 是株洲中车时代电气股份有限公司（简称“中车时代电气”）最新开发的 DSC 平面封装汽车 IGBT 模块的结构剖面图。功率芯片的表面为可焊接的特殊金属化层，通过焊接或银烧结技术与两层绝缘衬板相连，上层衬板的电路布局帮助形成模块电路结构，电流流经上层衬板的覆铜层，使载流能力得到加强。芯片产生的热量通过两层衬板扩散到外部水冷散热器，同时具有双面绝缘能力。绝缘衬板为采用活性金属钎焊 (active metal brazing, AMB) 技术制造的具有高热导率的 AlN 材料与覆铜层结合，其热性能好、可靠性高。模块外壳通过转模技术形成，具有较高的工作温度和可靠性^[17-18]。

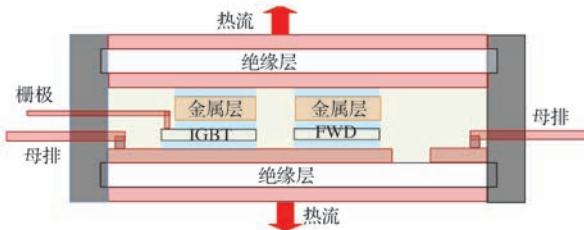


图 1 平面封装 DSC 电动汽车功率 IGBT 模块剖面图
Fig. 1 Schematic cross section of a planar packaging DSC automotive power IGBT module

由图 1 可见，芯片上表面通过一层金属垫片与上层衬板焊接在一起，这样增加了两层衬板之间的距离，为栅极引线键合和转模树脂灌封提供空间。由于金属垫片的存在，引起芯片上下的散热路径并不对称，因此，此 DSC 模块的等效 $R_{th J-C}$ 并不能减小到相同结构的单面散热模块的一半。

图 2 是此 DSC 模块芯片到上下衬板的热阻及其整体热阻与 DLC 模块 $R_{th J-C}$ 的比较。可见，芯片到上层衬板的热阻 (DSC J-Top) 比到下层衬板的热阻 (DSC J-Bot) 高 30% 左右。由于 DSC 模块没有基板，其热阻比 DLC 模块的低 50% 以上。

由于 DSC 模块没有集成直接水冷散热器，模块在应用中需要通过导热材料或焊接与外部散热器接触，从而增加了芯片到散热器的热阻 ($R_{th J-H}$)。图 3 是芯片到外部散热器的热阻网络，焊接层或导热材料结合层将引起整体热阻的上升（其中 T_{CB} 为外壳底部温度， T_{CT} 为外

壳顶部温度）。图 4 是 DSC 模块在不同安装方式下的等效 $R_{th J-H}$ 及其与 DLC 模块的比较。DLC 模块的 $R_{th J-C}$ 与 $R_{th J-H}$ 是相同的；通过导热材料压接安装的 DSC 模块，其 $R_{th J-H}$ 比 DLC 模块减小 30% 左右，此数值受导热材料的热导率影响；通过焊接安装的 DSC 模块热阻将比 DLC 结构的减小 40% 左右。

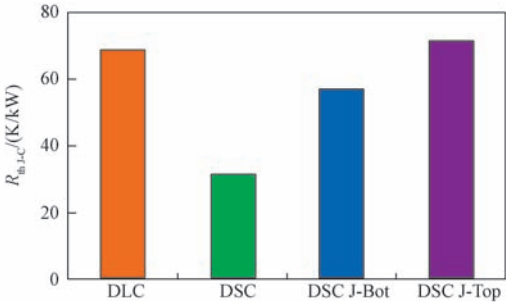


图 2 DSC 模块的 $R_{th J-C}$ 及其与 DLC 模块的比较
Fig. 2 Equivalent thermal resistance $R_{th J-C}$ of DSC module and DLC module

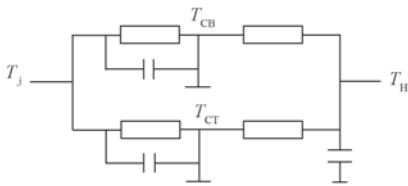


图 3 DSC 模块等效 $R_{th J-H}$ 网络
Fig. 3 The equivalent $R_{th J-H}$ network of DSC module

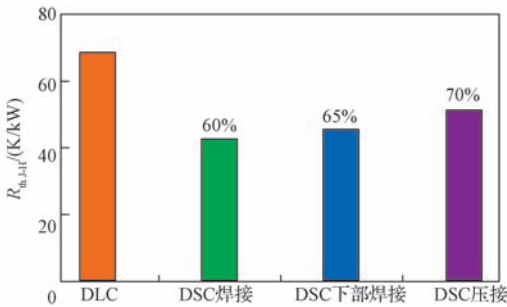


图 4 DSC 模块 $R_{th J-H}$ 及其与 DLC 模块比较
Fig. 4 $R_{th J-H}$ of DSC module and the comparison with DLC module

通过计算和模拟发现，DSC 平面芯片互连结构能大幅降低寄生电学参数^[19]，如表 4 所示。与引线键合结构相比，平面互连将减少寄生电感和电阻分别达 57% 和 75% 左右。

图 5 是通过焊接和端子超声焊接技术制造的 DSC IGBT 模块实物图。该 DSC IGBT 模块为 750 V/600 A 规格半桥型，持续输出功率 85 kW，最高工作温度 150 ℃。目前，该模块已经完成了全部电学和热学测试，并发布了初步数据手册，模块的汽车级标准验证已经基本完成，并形成了批量化生产的能力；同时，该模块已经安装到电动汽车 PCU 中并通过了环境试验和所有带负载工况试验考核。

表 4 键合引线 和 DSC 平面芯片互连的寄生电学参数比较

Tab. 4 Comparison of parasitic parameters between bonding wire and DSC planar interconnection on chips

		$R/\text{m}\Omega$	L_{SCE}/nH
互连技术	引线键合	0.3	10.8
	平面互连	0.074	4.6
寄生参数降低效果		75%	57%

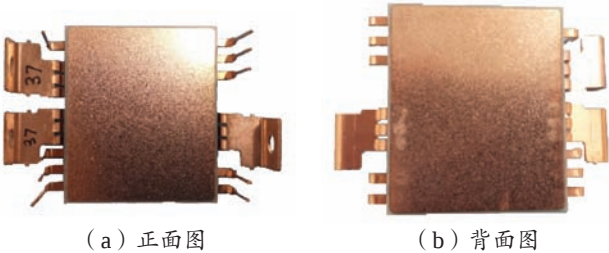


图 5 DSC 汽车 IGBT 模块样品

Fig.5 Prototype of DSC IGBT module for electric vehicle

2.2 直接端子键合平面汽车模块

直接端子键合 (DLB) 是一种较常用的平面封装技术，它将铜母排端子焊接或烧结于芯片表面，取代传统的键合引线结构。母排端子可以起到一定的散热效果，但由于母排一般不直接与散热器接触，其散热效果不如 DSC 平面结构。DLB 结构除了在一定程度上增强热学性能外，还可以使芯片表面温度场均匀分布，消除过热点，并降低模块的寄生电学参数，避免与引线键合相关的失效，从而增加模块安全工作区和长期可靠性^[14-15]。

图 6 是中车时代电气设计的 DLB 平面封装汽车模块的结构剖面图。功率芯片的上表面通过焊接或银烧结技术与功率端子相连，辅助和控制端子的连接则通过引线键合实现。铜母排的载流能力和散热能力都远远大于键合引线的，其接触电阻远小于引线的，因此寄生电阻引起的功耗减小，芯片温度进一步降低。此结构的下部采用集成直接液体冷却 DLC 基板结构，提高了热性能和可靠性。

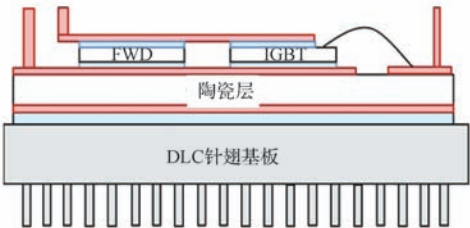


图 6 DLB 平面封装电动汽车功率 IGBT 模块剖面图
Fig. 6 Schematic cross section of a DLB planar packaging IGBT module for electric vehicle

图 7 是 DLB 平面封装汽车功率模块的机械结构设计。此模块设计的关键点是母排端子，由于采用通过几个整体母排连接多组芯片并形成模块电路结构，其形状和尺寸的设计尤为重要。设计中通过改进母排形状来优化寄生电学参数，增加电流能力；同时优化集成针翅的

形状、尺寸和布局，以降低热阻和流阻。为减轻模块重量并提高可靠性，集成基板可采用铜铝复合或 AlSiC 材料，如图 8 所示。

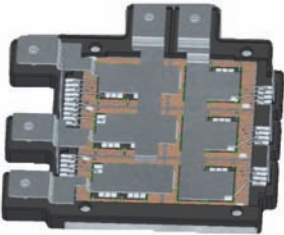


图 7 DLB 平面封装电动汽车功率 IGBT 模块结构设计
Fig. 7 Structure design of DLB planar packaging automotive power IGBT module

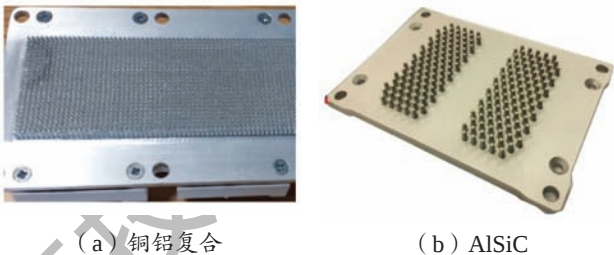


图 8 集成针翅直接液体冷却基板
Fig.8 Integrated pin fin direct liquid cooling baseplate

DLB 结构的母排端子厚度为 1 mm 以上，而 DSC 模块的绝缘衬板覆铜层厚度一般在 0.3 mm 左右，因此相比 DSC 结构，DLB 的互连结构引入的寄生电感和电阻都将大幅减小，由寄生效应引起的损耗和开关振荡都会减小，安全工作区和可靠性则会相应提高。然而在焊接及工作的温度变化过程中，DLB 结构的厚金属层对芯片的热-机械应力比 DSC 结构的大，对模块的可靠性和寿命造成不利影响。

2.3 PCB (printed circuit board) 平面互连功率模块

多层 PCB 具有导电及与外部绝缘的特性，可以作为功率半导体芯片表面的互连结构。通过 PCB 电路设计，将主电流端子和辅助 / 控制端子都集成在 PCB 内，实现功率模块的多芯片连接并形成模块电路结构，完全去除键合引线。PCB 的散热效果不明显，模块为单面散热结构。PCB 分为柔性和非柔性两种，其内部金属层一般比衬板表面金属层薄，所以通电流能力受到一定的限制，模块的功率等级不高。

图 9 是一款中车时代电气设计的柔性 PCB 平面封装小功率模块的机械设计图和 PCB 结构剖面图。此模块采用四层柔性 PCB 结构，两层金属和两层聚合物绝缘层。下层金属与芯片上表面通过银烧结连接，电流经金属通孔流入中间的主端子金属层，辅助和控制端子通过下层金属引出。模块为无基板结构，PCB 固定于塑料外壳上，如图 10 所示。

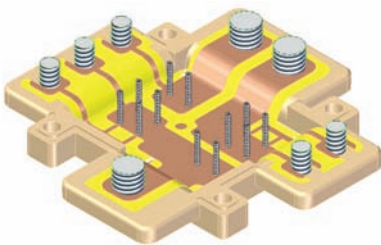
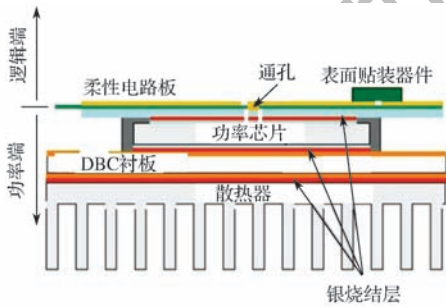


图 9 柔性 PCB 平面封装功率模块设计图
Fig.9 Design of planar packaging power module with flexible PCB

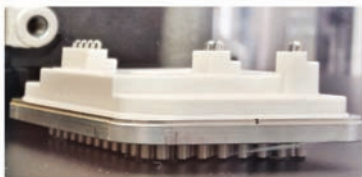


图 10 柔性 PCB 平面互连功率模块样品
Fig. 10 Prototype of planar packaging power module with flexible PCB

图 11 是一款柔性 PCB 封装的商业功率模块结构剖面图和产品，该模块集成直接水冷针翅基板，内部 3 个结合层都通过银烧结实现。模块电流电压等级为 1 700 V/180 A，半桥结构。由于采用平面无键合引线封装和银烧结技术，其功率循环能力为采用传统结构和连接技术模块的 10 倍左右。在结温差为 110 ℃时，能够完成 20 万次功率循环^[20]。



(a) 结构剖面图



(b) 产品

图 11 柔性 PCB 平面封装商业功率模块
Fig.11 A commercial flexible PCB packaged planar power module

除柔性 PCB 外，还可以采用非柔性 PCB 结构形成平面表面互连，其表面金属层能够做得比较厚，从而增大了电流和功率等级。图 12 是一款非柔性 PCB 平面互连模块结构设计图，在 PCB 上没有外接端子设计，端子需要通过衬板引出。目前，中车时代电气根据这种结

构设计的模块样品正在组装和测试之中。



图 12 非柔性 PCB 平面封装功率模块结构设计图
Fig. 12 Structure design of an inflexible PCB packaged planar power module

3 汽车功率模块平面封装技术发展展望

目前报道的平面 DSC 模块一般不能进行直接液体冷却，应用中通过导热材料与水冷散热器接触，以减小小接触界面热阻，增加散热效率。导热材料层将使芯片到散热器的热阻增加一倍左右，从而在很大程度上减弱了 DSC 模块的热性能和可靠性。在 DSC 模块中采用集成针翅衬板结构可以在应用中去掉导热材料层，实现双面直接水冷，从而大大降低模块的整体热阻。

在平面模块中采用倒装芯片 (flip chip) 技术可以在两层衬板或衬板与 PCB 之间不用金属垫片，形成半桥或其他复杂的电路结构，从而进一步减小平面模块的体积和重量。倒装芯片技术无需任何键合引线，形成最短的电路回路，降低寄生电学参数。

利用母排端子代替 DLB 平面模块的绝缘衬板并去除基板，可以实现由母排散热，称为芯片直接键合引线框架 (die on leadframe, DOL) 技术。此结构中芯片没有与外部绝缘，应用时需要在模块底部附加导热绝缘层，但由于节省了衬板和基板，使模块的体积、重量和成本大大降低。

4 结语

平面互连封装技术具有一系列电学、热学、机械及可靠性方面的优点，可以在很大程度上满足电动汽车对功率半导体模块在性能、尺寸和寿命等方面的要求。因此，平面封装功率 IGBT 模块已经成为汽车市场最受欢迎的产品。

本文讨论了目前应用于电动汽车功率模块封装的典型的平面封装技术；根据汽车功率系统对功率器件的性能要求，提出了平面封装是应对汽车模块封装面临挑战的主要应对措施；对当前典型的采用平面封装技术的电动汽车功率模块，如双面绝缘双面冷却模块、直接端子键合模块和平面 PCB 互连模块的结构和封装技术进行

了讨论和分析，同时针对下一步汽车级平面封装功率模块的主要技术发展方向进行了总结和展望。

参考文献：

[1] Climate Change and CO2: Automakers publish a comprehensive position paper [EB/OL]. (2008-05-31) [2017-08-01].http://www.oica.net/category/climate-change-and-co2.

[2] Technology Roadmap Electric and plug-in hybrid electric vehicles. International Energy Agency [EB/OL]. (2011-06-30) [2017-08-01].http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name.3851.en.html.

[3] NOGGIA P. Global Passenger Car Powertrain and Electric Vehicle Market: 2015 Outlook [EB/OL]. (2015-06-16) [2017-08-01].http://www.ukintpress-conferences.com/uploads/SPKEX15/Day1_4_Pietro_Boggia.pdf.

[4] LIANG Z. Status and trend of automotive power packaging [C] //24th Int. Symposium on Power Semiconductor Device & ICs (ISPSD). Bruges: IEEE, 2012: 325-331.

[5] KIMURA T, SAITOU R, KUBO K. et al. High-power-density Inverter Technology for Hybrid and Electric Vehicle Applications[J]. Hitachi Review, 2014, 63(2): 96-102.

[6] BAYERER R. Higher junction temperature in power modules – a demand from hybrid cars, a potential for the next step increase in power density for various Variable Speed Drives [C] // Int. Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Europe). Nuremberg, 2008.

[7] JOHN R, VERMESAN O, BAYERER R. High temperature power electronics IGBT modules for electrical and hybrid vehicles [C] // IMAPS High Temperature Electronics Network (HITEN).Oxford, 2009: 199-204.

[8] MARZ M, SCHLETZ A, ECHARDT B. et al. Power electronics system integration for electric and hybrid vehicles [C] // 6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS). Nuremberg, 2010: 227-236.

(上接第 28 页)

[53] 窦泽春, 刘国友, 陈俊, 等. 大功率压接式 IGBT 器件设计与关键技术 [J]. 大功率变流技术, 2016 (2) : 21-25.

DOU Z C, LIU G Y, CHEN J, et al. Design and Key Technologies of High-power Press-pack IGBT Device [J]. High Power Converter Technology, 2016 (2) : 21-25.

[54] 肖红秀, 窦泽春, 彭勇殿. 大功率压接式 IGBT 模块的热学设计与仿真 [J]. 大功率变流技术, 2016 (6) : 24-30.

XIAO H X, DOU Z C, PENG Y D. Thermal Design and Simulation of High Power Press-pack IGBT Module [J]. High Power Converter Technology, 2016 (6) : 24-30.

[55] 陈俊, 万超群, 陈彦, 等. 大功率压接式 IGBT 及其在脉冲强磁场发生器中的应用 [J]. 大功率变流技术, 2017 (3) : 59-62.

CHEN J, WAN C q, CHEN Y, et al. High Power Press-pack IGBT and Its Application in Pulsed Magnetic-field Generator e [J]. High Power Converter Technology, 2017 (3) : 59-62.

[56] LI Y, ZHU S W, MA Y Q. Highly Integrated Power Unit Based on Double Side Cooling IGBT Module [C] //PCIM Europe 2017, 2017:1792-1797.

[57] 赵振波, RUSCHE W, STEGNER A R. 新一代封装 PrimePACKTM3+ 提升 IGBT5 模块性能 [J]. 大功率变流技术, 2016(1): 26-29.

[9] NAGAUNE F, GHARA H, ADACHI S. et al. Small size and high thermal conductivity IGBT module for automotive applications[C] // PCIM Europe. Nuremberg, 2011: 785-790.

[10] 吴琪乐. HEV 和 EV 电力电子市场蓬勃发展 2020 年前可能采用 SiC 或 GaN 技术 [J]. 半导体信息, 2011(6): 32-33.

[11] WANG Y, DAI X, WU Y. et al. Integrated liquid cooling automotive IGBT module for high temperature coolant application [C] // PCIM Europe. Nuremberg, 2015: 1197-1203.

[12] HIGUCHI K, KITAMURA A, ARAI H. et al. An intelligent power module with accuracy control system and direct liquid cooling for hybrid system [C] // PCIM Europe. Nuremberg, 2014: 39-46.

[13] SKiM 63/93 IGBT Modules, Technical Explanations [EB/OL]. (2011-07-31) [2017-08-01].http://www.semikron.com/dl/service-support.

[14] ISHIHARA M, HIYAMA K, YAMADA K. et al. New transferrmold power module series for automotive power-train inverters [C] // PCIM Europe. Nuremberg, 2012: 1408-1413.

[15] ISHIHARA M, MIYAMOTO N, HIYAMA K. et al. New compact-package power modules for electric and hybrid vehicles (J1 series) [C] // PCIM Europe. Nuremberg, 2014: 1093-1097.

[16] ZHONG Y, MENG J, NING P. et al. Design & Analysis of a novel IGBT package with double-sided cooling [C] // IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Beijing, 2014: 1-6.

[17] WANG Y, LI Y, DAI X. et al. Thermal design of a dual sided cooled power semiconductor module for hybrid and electric vehicles [C] // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Tampa, 2017: 3068-3071.

[18] WANG Y, LI Y, MA Y. et al. Development of High Thermal Performance Automotive Power Module with Dual Sided Cooling Capability [C] // PCIM Europe. Nuremberg, 2017: 1-5.

[19] WANG Y, LI Y, WU Y. et al. Mitigation of challenges in automotive power module packaging by dual sided cooling [C] // 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe). Karlsruhe, 2016: 1-8.

[20] SCHEUERMAN U. Reliability of Planar SKiN Interconnect Technology [C] // CIPS. Nuremberg, 2012: 1-8.

ZHAO Z B, RUSCHE W, STEGNER A R. New Generation Package PrimePACKTM3+ Improving the Performance of IGBT5 Module[J]. High Power Converter Technology,2016(1):26-29.

[58] MAINALI K, TRIPATHI A, MADHUSOODHANAN S, et al. A Transformerless Intelligent Power Substation: A three-phase SST enabled by a 15-kV SiC IGBT [J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2015(9): 31-43.

[59] MADHUSOODHANAN S, MAINALI K, TRIPATHI A, et al. Power Loss Analysis of Medium-Voltage Three-Phase Converters Using 15-kV/40-A SiC N-IGBT [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(3):902-916.

[60] VECHALAPU K, BHATTACHARYA S, BRUNT E, et al. Comparative Evaluation of 15-kV SiC MOSFET and 15-kV SiC IGBT for Medium-Voltage Converter Under the Same dv/dt Conditions [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(1): 469-489.

[61] TRIPATHI A, MAINALI K, PATEL D, et al. Design Considerations of a 15-kV SiC IGBT-Based Medium-Voltage High-Frequency Isolated DC-DC Converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2015, 51(4): 3284-3294.