

车用 SiC-MOSFET 的应用与技术发展综述

李尊 张政 吴毅卓 王学耀

(陕西法士特齿轮有限责任公司, 西安 710119)

【摘要】针对硅基绝缘栅双极型晶体管(IGBT)难以进一步满足电动汽车高功率密度、低导通损耗、高散热能力等需求的不足,综述了车用碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管(SiC-MOSFET)的最新研究进展。通过总结 SiC-MOSFET 在电动汽车牵引逆变器、DC/DC 电源变换器和车载充电机(OBC)应用场景下的特点,分析了目前车用 SiC-MOSFET 在成本、可靠性及散热方面的技术挑战,并探讨了其在微型化、先进封装、多芯片集成和成本方面的发展趋势。

关键词: 电动汽车 碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管 功率半导体芯片 导通损耗 转换效率

中图分类号:U469.72

文献标志码:A

DOI: 10.20104/j.cnki.1674-6546.20240189

A Review of SiC-MOSFET in Electric Vehicles: Application and Technology Development

Li Zun, Zhang Zheng, Wu Yizhuo, Wang Xueyao

(Shaanxi Fast Gear Co., Ltd., Xi'an 710119)

【Abstract】In response to the difficulty of silicon-based Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) in meeting the high power density, low conduction loss and high heat dissipation requirements of electric vehicles, this paper reviews the latest research progress on Silicon Carbide-Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor (SiC-MOSFET) for automotive applications. By summarizing the characteristics of SiC-MOSFET in the application scenarios of electric vehicle traction inverters, DC/DC power converters and On-Board Chargers (OBC), this paper analyzes the current technical challenges of SiC-MOSFET in terms of cost, reliability as well as heat dissipation, and explores their future development trends in miniaturization, advanced packaging, multi-chip integration and cost.

Key words: Electric vehicle, SiC-Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (SiC-MOSFET), Power semiconductor chip, Conduction loss, Conversion efficiency

【引用格式】李尊,张政,吴毅卓,等. 车用 SiC-MOSFET 的应用与技术发展综述[J]. 汽车工程师, 2025(4): 1-9.

LI Z, ZHANG Z, WU Z Y, et al. A Review of SiC-MOSFET in Electric Vehicles: Application and Technology Development[J]. Automotive Engineer, 2025(4): 1-9.

1 前言

为提升电能利用效率,电动汽车行业对更高功率密度、更小尺寸的功率半导体器件的需求日趋强烈。目前,功率半导体主要包括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)。

传统的功率半导体器件大多采用硅基材料,硅

基 IGBT 可承受更大的电压、更高的功率,广泛应用于新能源汽车的高压系统中,如主驱动电机的逆变器。硅基 MOSFET 因其高频特性好、开关速度快、成本较低,主要在汽车低压电器中使用,如电动座椅调节、电池电路保护、刷水器的直流电机、发光二极管(Light Emitting Diode, LED)照明系统等^[1]。同时,硅基半导体固有的局限性(如开关损耗高、开关速度有限)导致硅基 IGBT 的开关频率限制在 20 kHz 左右^[2]。

随着半导体材料的快速发展,以碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)为代表的第三代功率半导体材料具有更高的热导率、较大的相对介电常数、更快的电子饱和漂移速度、更高的熔点和更高的莫氏硬度^[3],受到越来越多的关注。基于SiC材料制造的碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管(SiC-Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, SiC-MOSFET)相较于硅基功率半导体器件,具有更小的开关损耗、更高的开关速度、更小的尺寸、更高的击穿电压和更高的承受温度,可用于提高转换器和逆变器的效率、功率密度,节省车辆的空间。碳化硅半导体用于逆变器、DC/DC电源变换器和车载充电机(On-Board Charger, OBC)时,较低的阻抗可以带来更小

的损耗和部件尺寸^[4-5]。

本文总结SiC-MOSFET在电动汽车不同应用场景中的特点,分析车用SiC-MOSFET技术面临的挑战,并结合车用SiC-MOSFET技术的最新进展分析其未来发展趋势。

2 SiC-MOSFET在电动汽车上的应用优势

SiC-MOSFET作为功率半导体在电动汽车领域的主要应用场景如图1所示,包括用于驱动电机的牵引逆变器、DC/DC电源变换器,以及用于交流充电的OBC及非车载充电设备,如直流快速充电站或无线充电^[6],并已在部分电动汽车上实现了应用^[7-9]。

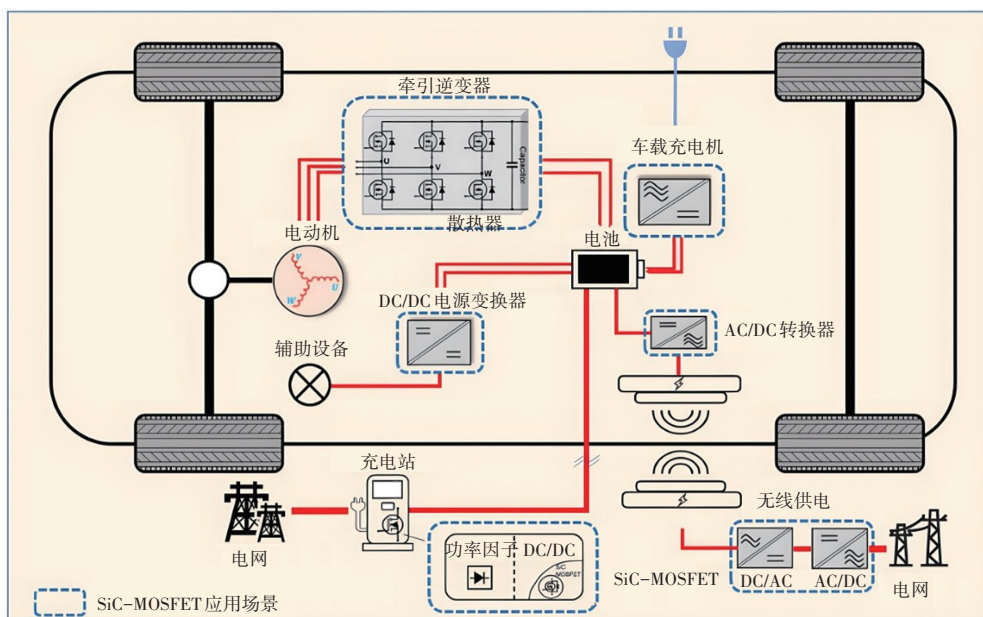


图1 SiC-MOSFET在电动汽车上的应用场景^[6]

2.1 SiC-MOSFET在牵引逆变器上的应用优势

相较于硅基半导体, SiC-MOSFET因碳化硅材料具有更高的饱和电子漂移速度和更大的带隙,为更快的开关速度和更高的开关频率提供了可能。同时,较高的开关速度能够减小开关损耗,较小的接通电阻减少了SiC-MOSFET的传导损耗,从而使SiC-MOSFET获得更高的效率和功率密度。目前, SiC-MOSFET的峰值效率达到98%以上,功率密度达到70 kW/L以上^[10-11]。Allca-Pekarovic等^[12]分别采用硅基IGBT和SiC-MOSFET作为电动汽车牵引逆变器的功率半导体,发现与硅基IGBT逆变器相比, SiC-MOSFET在一个驱动周期中可以减少39.8%的能量损失。

此外,由于具备更高的承受温度、更好的散热

能力、更高的机械强度,采用SiC-MOSFET的牵引逆变器的使用寿命可延长80%以上^[13]。Su等^[14]发现,在车辆频繁起停的城市工况下, SiC-MOSFET逆变器较硅基逆变器具有能量损耗减少和可靠性提升的明显优势。较高的温度耐受性和更好的散热性能使SiC-MOSFET逆变器可以在较高的环境温度下实现高功率密度工作,这为简化逆变器及车辆冷却系统,甚至使用风冷逆变器提供了可能^[15]。

2.2 SiC-MOSFET在车载DC/DC电源变换器中的应用优势

为确保车载DC/DC电源变换器的最佳性能,须提供稳定的直流电压并响应负载的迅速变化。

SiC-MOSFET应用于车载DC/DC电源变换器时

具有以下优势:更低的开关和传导损耗可以获得更高的效率和功率密度,更高的介电强度可以使其在更高的电压下工作,更大的工作温度范围可以提高其在不同工作温度下的稳定性。Kreutzer等^[16-17]开发了一种基于SiC-MOSFET的高效车载DC/DC电源变换器,其以15 kW的低功率工作时,功率转换效率达到98%,以100 kW的高功率工作时效率达到99.7%,并能在800 V高电压下正常工作。基于SiC-MOSFET的车载DC/DC电源变换器的功率密度能够达到43 kW/L,远大于硅基功率半导体DC/DC电源变换器的功率密度^[18]。基于SiC-MOSFET的DC/DC电源变换器的尺寸可以进一步缩小,从而增大车内可用空间^[19]。

2.3 SiC-MOSFET在OBC中的应用优势

OBC是将动力电池与外部电源建立联系、进行电力传输的重要部件,目前,大多数纯电动汽车和插电式混合动力汽车都配备了OBC。

随着电动汽车对快速充电需求的不断增长,大功率、高效率和小体积成为OBC的发展方向。使用SiC-MOSFET作为OBC的功率半导体器件,可以提高功率密度、充电效率和散热能力,并减小空间占用。Li等^[20]提出一种采用SiC-MOSFET的6.6 kW电感-电感-电容器(LLC)的OBC,峰值效率超过96%,功率密度为3.42 kW/L。Gong等^[21]设计了一种基于SiC-MOSFET的OBC,在输入240 V交流电、输出400 V直流电的工作条件下,峰值效率高达98.9%,总谐波失真小于2%。基于SiC-MOSFET的OBC的

输出功率可达22 kW、峰值效率达到97%^[22-23]。同时,相较于硅基OBC,采用SiC-MOSFET可使OBC的体积减小24%、质量减轻28%,功率密度提高72%以上^[24]。

3 车用SiC-MOSFET技术面临的挑战

尽管SiC-MOSFET性能优异,在电动汽车领域具有较高的应用价值,但与硅基IGBT相比,仍存在一些技术挑战。

3.1 成本问题

目前, SiC-MOSFET的成本十分高昂^[25], SiC-MOSFET模块的价格是硅基IGBT模块的3~5倍^[26]。SiC-MOSFET在电动汽车上使用数量的增加,将导致整车成本上升、价格竞争力下降。值得注意的是, SiC-MOSFET应用于电动汽车功率转换部件时,可以减少除功率半导体之外的零部件成本,如散热系统成本。

为了更好地评估引入SiC-MOSFET导致的成本提高情况,建立相应的SiC-MOSFET逆变器和转换器的成本模型。以电子元件分销商DigiKey的价格作为参考^[6],对比硅基IGBT和SiC-MOSFET在汽车上应用的成本,逆变器的总成本如表1所示,逆变器与转换器的总成本如表2所示,OBC成本如表3所示。综合来看,以SiC-MOSFET作为电动汽车功率半导体的成本较使用硅基IGBT的成本高。未来,随着技术的进步及SiC量产带来的成本下降, SiC-MOSFET很有希望取代硅基IGBT。

表1 硅基IGBT和SiC-MOSFET单相逆变器成本^[6]

美元

部件	硅基IGBT逆变器		SiC-MOSFET逆变器	
	型号	费用	型号	费用
开关装置	FF150R12YT3BOMA1	356.16	CAB006A12GM3	1 015.68
门驱动器	MEA1D0515DC+1ED020112F2XUMA1	42	MGJ2D122005MPC+1ED020112F2XUMA1	51.48
电容器	947D421K122CGRSN, 200V/420uF	107	947D421K122CGRSN, 1200V/420uF	107
散热器		51.9		44.7
控制器		150		150
总费用		707.06		1 369.22

表2 硅基IGBT和SiC-MOSFET逆变器系统成本^[6] 美元

部件	硅基IGBT逆变器费用	SiC-MOSFET逆变器费用
逆变器	707.06	1 369.22
电池	5 760	5 355
接触器	74	74
总费用	6 541.06	6 798.22

表3 采用硅基IGBT和SiC-MOSFET的OBC成本^[6] 美元

部件	硅基IGBT转换器费用	SiC-MOSFET转换器费用
开关装置	41.88	158.64
电感器	125	48
散热器	39.79	22.91
总费用	206.67	229.55

3.2 可靠性问题

功率半导体的可靠性通常是指在动态运行条件下出现的极端运行温度、器件老化和性能损坏等问题,与车辆安全密切相关。SiC-MOSFET受其材料特性和制造工艺影响,需进一步研究和验证可靠性。

3.2.1 栅氧问题

SiC-MOSFET和硅基IGBT都使用二氧化硅栅极氧化物,但SiC-MOSFET较硅基半导体具有更高的栅氧缺陷。这主要是由于SiC-MOSFET器件栅氧界面处的势垒高度较低,这使得沟道中的载流子更容易穿过势垒进入氧化层,影响栅氧化层的质量。另一方面,SiC氧化过程中残留在界面处的碳元素会在SiC/SiO₂的界面处形成较高的界面态密度^[27],进而影响SiC-MOSFET器件的性能和可靠性^[28]。界面处的电荷陷阱通过俘获电荷降低载流子密度,通过库伦散射降低载流子迁移率,影响SiC-MOSFET的电流能力和跨导等特性;界面态电荷陷阱在器件开启和关断的过程中俘获和释放载流子,使SiC-MOSFET的阈值电压发生漂移^[29]。栅氧化层和界面态电荷陷阱增大SiC-MOSFET在高电场下的隧穿电流,增大漏电流、击穿栅氧介质导致器件失效。汽车上应用的SiC-MOSFET由于栅极氧化问题,功率转换装置可能以振荡方式运行,导致逆变器失控,影响电机运行。

3.2.2 体二极管可靠性问题

SiC-MOSFET体二极管的反向恢复时间短、恢复损耗小,具有很好的正向工作特性,在电路中可以用于吸收感性负载产生的电流,起到续流二极管的作用。但当电流持续通过时,SiC-MOSFET体二极管的通态电压可能会随时间延长而变大,即出现“体二极管双极型退化”现象,这主要是由碳化硅衬底上存在的基晶面位错缺陷触发的。该退化导致开启状态下载流子传导差、关闭状态下漏电流大,使逆变器和DC/DC电源变换器在低负载条件下运行不稳定^[30]。

在体二极管工作时,电子与空穴的复合所释放出的能量导致堆垛层错在基晶面位错处蔓延,直至蔓延到芯片的表面,如图2所示^[31-32]。

图3所示为无层错缺陷器件和有少量层错缺陷的SiC-MOSFET芯片在导通模式下利用红外热像仪拍摄的对比图像,图中温度代表了电流的密度^[31]。从图3中可以看出,有堆垛层错的区域温度远低于正常区域温度,这是因为层错缺陷导致该区

域导电能力下降,流过的电流很小,几乎没有产生热量。

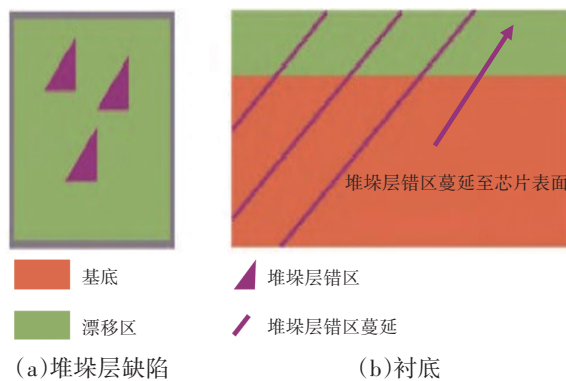


图2 堆垛层错蔓延示意^[31]

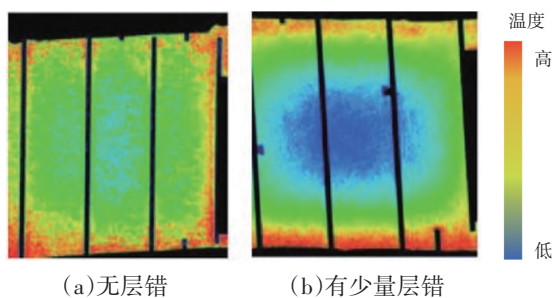


图3 导通模式下电流密度对比^[31]

3.2.3 短路问题

SiC-MOSFET管芯面积小、电流密度大且抗短路能力较弱,因此对电路保护要求更高,特别是在大功率领域,这一问题更加突出^[32]。这是由于碳化硅/氧化物界面陷阱密度比硅/氧化物高2个数量级,为了取得较高的阈值电压,碳化硅场效应晶体管的氧化层厚度往往较硅场效应晶体管的薄,这使得在高电应力的条件下,碳化硅场效应晶体管的氧化层更容易失效^[33]。同时,由于同样功率等级条件下,碳化硅场效应晶体管的芯片面积较硅场效应晶体管的小,使碳化硅场效应晶体管承受了更高密度的电流应力,因而碳化硅场效应晶体管的短路抵御能力较硅场效应晶体管弱^[34]。

与硅基IGBT的短路耐受时间10 μs相比,SiC模块的短路耐受时间明显缩短,约为2 μs^[35],这表明SiC-MOSFET短路耐受性较弱。由于SiC-MOSFET具有沟槽结构,短路临界能量小于平面栅MOSFET,使SiC-MOSFET比硅基MOSFET对短路现象更敏感^[27]。此外,与模具面积96 mm²左右的硅基MOSFET相比,SiC-MOSFET的模具面积只有5.52 mm²左右,导致具有更高的短路功率密度和更快的结温升高速度,可能导致击穿故障^[36]。当SiC-MOSFET是逆变器和DC/DC电源变换器的主要

部件时,它们较弱的短路承受能力使得传动系统在车辆上坡和高速行驶等重载条件下更容易突然丧失动力。

3.3 散热问题

相较于硅基 IGBT, SiC-MOSFET 的散热面积更小,相同的电流通过时电流密度更高,这会导致单位面积产生更多的热量,造成结温升高速度更快。因此,热管理成为制约 SiC-MOSFET 应用的重要因素。

SiC-MOSFET 和硅基 IGBT 的换热器的热阻由底板的导电热阻、传热面的对流热阻和扩散热阻组成。换热器的理论最小热阻(即热极限)可以通过换热面的性能极限和最佳底板厚度实现。随着散热面积的减小,换热器中的扩散热阻增大,如图 4 所示。SiC-MOSFET 模块的换热器由于散热面积较小,可能不满足所需的散热要求^[37]。

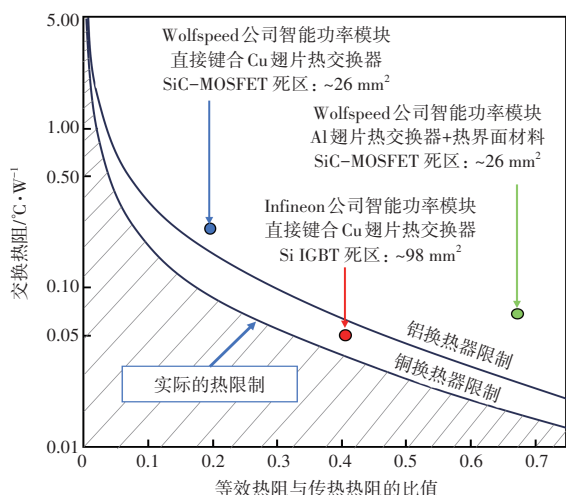


图 4 铜、铝换热器的热极限与有效面积比^[37]

4 车用 SiC-MOSFET 发展趋势

4.1 微型化

当前,每片 SiC 晶圆的生产成本为 1 500~1 800 美元^[38],单个 SiC 使用晶圆的成本与其使用面积成正比,于是,制造商通过在单片晶圆上获得更多的 MOSFET 来降低 SiC-MOSFET 的生产成本。

此外,还可以通过微型化来提高 SiC-MOSFET 的良品率,进而降低成本。SiC-MOSFET 的良品率与芯片面积的关系如图 5 所示,良品率随芯片面积的增大呈显著下降趋势。而为了提高器件的通流能力,大电流规格下的器件常具有较大的芯片面积,对器件良品率造成影响^[39]。因

此,在保持大电流器件性能不变的前提下,应尽可能地设计小面积芯片(即微型化),以兼顾高性能和高良品率。

4.2 先进封装技术

先进封装技术能够改善 SiC-MOSFET 的散热条件,减小寄生参数,提高功率模块的鲁棒性和可靠性^[40]。SiC-MOSFET 的先进封装技术^[41]主要包括:芯片顶部连接采用铜-铜(Cu-Cu)键合方式,通过对芯片顶部进行铜质金属化(基板表面也为铜),获得最佳的表面同质结合,改善连接寿命和芯片表面的散热状况;芯片底部连接依据底部金属化的不同,分别采用铜锡或镍锡混合焊料进行扩散焊,在结合面产生 5 μm 以上的金属化合物层;系统连接采用焊接方式,通过调节焊料中锡、银、铜的比例和工艺过程,获得最佳的结合面弹性模量。

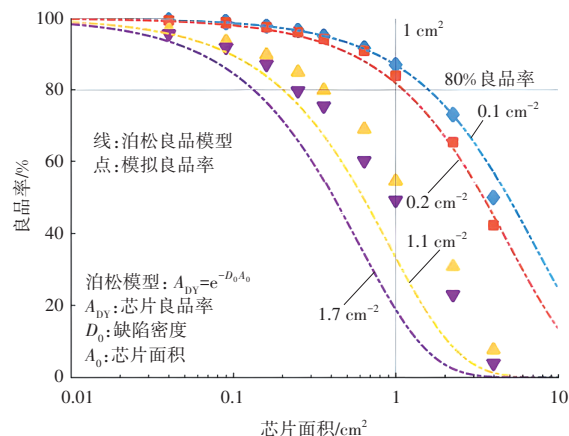


图 5 产品良品率与芯片面积的关系^[40]

近年来,基板的叠层构型出现了新趋势,嵌入式基板将芯片和基板都埋入某种载体中,芯片和嵌入基板均使用双面银烧结进行连接,由此实现双面散热。嵌入式基板、双面空冷散热的剖面构造如图 6 所示^[42]。其中,顶部和底部嵌入基板与散热器的结合面均使用热界面材料,可改善导热并减缓机械应力。

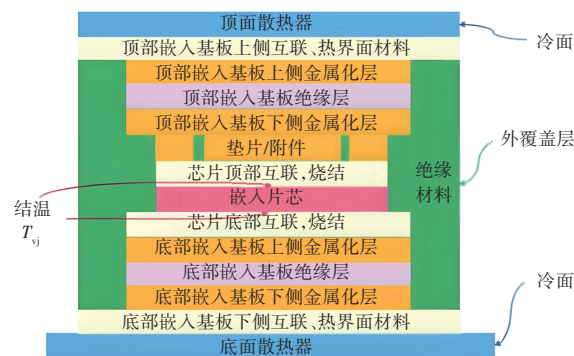


图 6 嵌入式基板、双面空冷散热的剖面构造^[42]

4.3 多芯片集成

2018年,三菱将肖特基势垒二极管(Schottky Barrier Diode, SBD)与SiC-MOSFET集成到同一芯片,形成较低的碳化硅SBD正向压降和较高的电流输出能力,可在一定电流范围内避免SiC-MOSFET寄生双极体二极管导通和双极退化问题,其结构如图7所示^[43]。

集成芯片较传统SiC-MOSFET芯片面积有所增加,但相比SiC-MOSFET外置SBD的方案节约了SBD芯片终端区和划片道区面积,可以布置更多芯片,从而具有更大的电流能力。三菱据此研制出6.5 kV SiC-MOSFET芯片和对应的全碳化硅模块样品,相较于传统的6.5 kV硅基IGBT模块,大幅降低了导通损耗、关断损耗和开关损耗,总损耗降低至原来的1/10;与外置SBD的SiC-MOSFET相比,导通损耗和开关损耗分别下降了18%和80%。

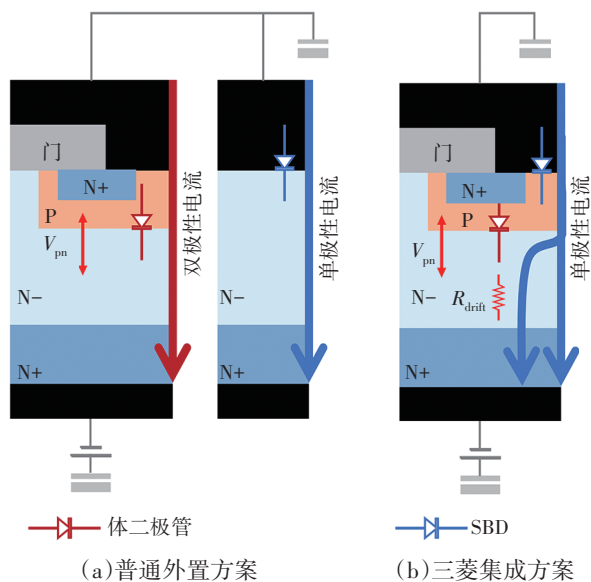


图7 SBD外置及集成状态下的SiC-MOSFET结构

4.4 未来成本趋势

尽管SiC-MOSFET模块的价格是硅基IGBT模块价格的3~5倍,但对于新能源汽车,采用SiC-MOSFET模块可以降低6%~10%的功率损耗,长时间尺度下节省的电池成本将超过采用SiC-MOSFET器件增加的成本。同时,考虑到800 V高压平台在新能源汽车上的推广,SiC-MOSFET模块的优势被进一步放大,使用SiC可以助力电驱动系统升级,以适应电压等级从400 V升级到800 V的变化。

未来,影响车载SiC-MOSFET模块成本的因素

包括材料成本、制造工艺、产业规模等。随着生产技术的不断进步和规模化生产的推进,SiC材料的成本有望逐渐降低。制造技术的提升和工艺流程的优化将进一步提高生产效率,从而降低SiC-MOSFET模块的生产成本。纯电动汽车和混合动力汽车市场的不断扩大及智能汽车技术的快速发展,对SiC功率半导体器件的需求将不断增加,产业规模有望扩大,进而促使成本降低。

5 结束语

车用SiC-MOSFET具有高效率、高功率密度、可简化冷却系统等独特优势,为车内紧凑的内部空间布局和电能的转换、利用提供了更多可能。相较于硅基IGBT, SiC-MOSFET具有更高的工作频率和击穿电压,在高压(800 V)快速充电方面具有很高的应用价值。SiC-MOSFET的应用为这些场景带来了更高的效率、功率密度和更小的尺寸、更轻的质量。与此同时, SiC-MOSFET也面临成本高昂、可靠性有待提升和散热等问题。未来, SiC-MOSFET将进一步微型化以降低成本和提高可靠性,采用先进封装技术以改善散热和提高机械强度,通过多芯片集成进一步减小单个芯片的占用空间。同时,材料成本的下降、制造工艺的提升及产业规模的扩大,将为车用SiC-MOSFET的发展提供更广阔的空间。

参考文献

- [1] 罗皓泽,高洪艺,朱春林,等. 电动汽车IGBT芯片技术综述和展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5718-5730.
- [2] LUO H Z, GAO H Y, ZHU C L, et al. Review and Prospect of IGBT Chip Technologies for Electric Vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5718-5730.
- [3] WEI L Y, LI Z X, XU F, et al. Loss Optimization of Series Resonant Dual Active Bridge DC-DC Converter Using Hybrid Switch[C]// 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2019). Lisbon, Portugal: IEEE, 2019: 4108-4112.
- [4] ZHANG L, YUAN X B, WU X J, et al. Performance Evaluation of High-Power SiC MOSFET Modules in Comparison to Si IGBT Modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1181-1196.
- [5] FABRIZIO R, PATRICK F, GIUSEPPE G, et al. Emerging Trends in Wide Band Gap Semiconductors (SiC and GaN) Technology for Power Devices[J]. Microelectronic Engineering, 2018, 187/188(2): 66-77.

- [5] NGUYEN H V, LEE D C, BLAABJERG F. A Novel SiC-Based Multifunctional Onboard Battery Charger for Plug-in Electric Vehicles[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(5): 5635–5646.
- [6] SHI B F, RAMONES A I, LIU Y X, et al. A Review of Silicon Carbide MOSFETs in Electrified Vehicles: Application, Challenges, and Future Development[J]. *IET Power Electronics*, 2023, 16(12): 2103–2120.
- [7] ZHU Q L, WANG L, HUANG A Q et al. 7.2-kV Single-Stage Solid-State Transformer Based on the Current-Fed Series Resonant Converter and 15-kV SiC Mosfets[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(2): 1099–1112.
- [8] 袁素. 新能源汽车点燃碳化硅热潮[J]. *能源评论*, 2020(9): 70–73.
YUAN S. New Energy Vehicles Ignite the Craze for Silicon Carbide[J]. *Energy Review*, 2020(9): 70–73.
- [9] MOHAMMED S A Q, JUNG J W. A Comprehensive State-of-the-Art Review of Wired/Wireless Charging Technologies for Battery Electric Vehicles: Classification/Common Topologies/Future Research Issues[J/OL]. *IEEE Access*, 2021(9): 19572–19585. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3055027.
- [10] ZHU J L, KIM J H, CHEN H, et al. High Efficiency SiC Traction Inverter for Electric Vehicle Applications[C]// 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2018). San Antonio, Texas, USA: IEEE, 2018: 1428–1433.
- [11] LI Y, ZHANG Y, YUAN X, et al. 500 kW Forced Air-Cooled Silicon Carbide (SiC) Three-Phase DC/AC Converter with a Power Density of 1.246 MW/m³ and Efficiency>98.5%[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, 57(5): 5013–5027.
- [12] ALEXANDER A P, PHILLIP K P, PARISA M, et al. Comparison of IGBT and SiC Inverter Loss for 400V and 800V DC Bus Electric Vehicle Drivetrains[C]// 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2020). Detroit, Michigan, USA: IEEE, 2020: 6338–6344.
- [13] SEPIDEH A, TORBJORN T, DAN H. Mission-Profile-Based Lifetime Study for SiC/IGBT Modules in a Propulsion Inverter[C]// 2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference. Gliwice, Poland: IEEE, 2021: 264–271.
- [14] SU M, CHEN C, SHARMA S, et al. Performance and Cost Considerations for SiC-Based HEV Traction Inverter Systems[C]// 2015 IEEE 3rd Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA 2014). Blacksburg, Virginia, USA: IEEE, 2015: 347–350.
- [15] ZENG Z, ZHANG X, BLAABJERG F, et al. Stepwise Design Methodology and Heterogeneous Integration Routine of Air-Cooled SiC Inverter for Electric Vehicle[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(4): 3973–3988.
- [16] OTTO K, MARKUS, MATIN M. A Passively Cooled 15kW, 800V DC-DC Converter with a Peak Efficiency of 99.7% [C]// 2017 IEEE AFRICON. Cape Town, South Africa: IEEE, 2017: 1390–1396.
- [17] OTTO K, BERND E, MATIN M. Unidirectional Fast Switching Non-Isolated 100kW Fuel Cell Boost Converter [C]// 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications. Lappeenranta, Finland: IEEE, 2014: 1020–1029.
- [18] ALEXANDER S, ARNE H W, KARL O, et al. Modular Bidirectional Full-SiC DC-DC Converter for Automotive Applications[C]// 2017 IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS 2017). Honolulu, Hawaii, USA: IEEE, 2017: 277–281.
- [19] MARC-ANDRE O, MANFRED D, Wu X Q, et al. Next Generation DC-DC Converters for Auxiliary Power Supplies with SiC MOSFETs[C]// 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC 2018). Nottingham, United Kingdom: IEEE, 2018: 1–6.
- [20] LI H R, ZHANG Z L, WANG S D, et al. A 300kHz 6.6kW SiC Bidirectional LLC Onboard Charger[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(2): 1435–1445.
- [21] GONG X, WANG G Y, BHARDWAJ M. 6.6kW Three-Phase Interleaved Totem Pole PFC Design with 98.9% Peak Efficiency for HEV/EV Onboard Charger[C]// 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2019). Anaheim, California, USA: IEEE, 2019: 2029–2034.
- [22] KNOLL J, DIMARINO C, STAHR H, et al. A PCB-Embedded 1.2kV SiC MOSFET Package with Reduced Manufacturing Complexity[J/OL]. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 2023(4): 549–560. DOI: 10.1109/OJPEL.2023.3293729.
- [23] WEI C, XIE H T, LIU Y, et al. A SiC Based High Efficiency 22kW Bi-Directional EV On-Board Charger [C]// International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Online: VDE, 2021: 1–7.

- [24] SUI G J. Comparison of Si, SiC, and GaN Based Isolation Converters for on-Board Charger Applications [C]// 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2018). Portland, Oregon, USA: IEEE, 2018: 1233-1239.
- [25] CHANG F Q, ILINA O, LIENKAMP M, et al. Improving the Overall Efficiency of Automotive Inverters Using a Multilevel Converter Composed of Low Voltage Si MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3586-3602.
- [26] SPIELER M, CHANG C W, EL-REFAIE A, et al. PCB Technology Comparison Enabling a 900V SiC MOSFET Half Bridge Design for Automotive Traction Inverters[C]// 2022 24th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2022 ECCE Europe). Hanover, Germany: IEEE, 2022.
- [27] WANG J, JIANG X. Review and Analysis of SiC MOSFETs' Ruggedness and Reliability[J]. IET Power Electronics, 2020, 13(3): 445-455.
- [28] 郭元旭. 高压4H-SiC MOSFET器件设计与可靠性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- GUO Y X. Design and Reliability Study of High Voltage 4H SiC MOSFET Devices[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [29] 江芙蓉, 杨树, 盛况. 碳化硅MOSFET特征参数随温度变化的比较研究[J]. 电源学报, 2018, 16(6): 143-151.
- JIANG F R, YANG S, SHENG K. Comparative Study on Temperature-Dependent Characteristic Parameters of SiC MOSFET[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(6): 143-151.
- [30] KANG M, YU S, XING D, et al. Body Diode Reliability of Commercial SiC Power MOSFETs[C]// 2019 IEEE 7th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA 2019). Raleigh, North Carolina, USA: IEEE, 2019: 416-419.
- [31] 张秋, 闫美存. SiC MOSFET体二极管双极退化可靠性试验方法研究[J]. 信息技术与标准化, 2022(9): 36-39.
- ZHANG Q, YAN M C. Research on Reliability Test Method for Bipolar Degradation of SiC MOSFET Body Diode[J]. Information Technology & Standardization, 2022 (9): 36-39.
- [32] 秦海鸿, 徐克峰, 王丹, 等. SiC MOSFET短路特性[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(3): 348-354.
- QIN H O, XU K F, WANG D, et al. Short-Circuit Characteristics of SiC MOSFET[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(3): 348-354.
- [33] 周郁明, 刘航志, 杨婷婷, 等. 碳化硅MOSFET电路模型及其应用[J]. 西安电子科技大学学报, 2018, 45(3): 97-101+129.
- ZHOU Y M, LIU H Z, YANG T T, et al. Circuit Model of SiC MOSFET and Application[J]. Journal of Xidian University, 2018, 45(3): 97-101+129.
- [34] 周郁明, 蒋保国, 陈兆权, 等. 场效应晶体管短路失效的数值模型[J]. 西安电子科技大学学报, 2019, 46(4): 66-73.
- ZHOU Y M, JIANG B G, CHEN Z Q, et al. Numerical Model of Short Circuit Failure of Field Effect Transistors[J]. Journal of Xidian University, 2019, 46(4): 66-73.
- [35] MOCEVIC S, WANG J, BURGOS R, et al. Comparison and Discussion on Shortcircuit Protections for Silicon-Carbide MOSFET Modules: Desaturation Versus Rogowski Switch-Current Sensor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(3): 2880-2893.
- [36] SAEED J, OLAYIWOLA A, ROOZBEH B, et al. An Analysis of the Switching Performance and Robustness of Power MOSFETs Body Diodes: A Technology Evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2383-2394.
- [37] CATUNEANU A, BURGERS J G, FLEURY P, et al. Practical Limits of Liquid Cooling Electric Vehicle Power Modules[C]// 2021 33rd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD 2021). Nagoya, Japan: IEEE, 2021: 379-382.
- [38] SCHLÜTER M, UHLEMANN A, PFOST M. A Medium Power SiC Module with Integrated Active Snubber for Lowest Switching Losses[C]// 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2020). New Orleans, Louisiana, USA: IEEE, 2020: 1496-1500.
- [39] SAMESHIMA J, ISHIYAMA O, SHIMOZATO A, et al. Relation Between Defects on 4H-SiC Epitaxial Surface and Gate Oxide Reliability[C]// Silicon Carbide and Related Materials 2012 (ECSCRM 2012). St. Petersburg, Russian Federation: ECSCRM, 2013: 745-748.
- [40] LIU T S, ZHU S N, JIN M, et al. Impacts of Area-Dependent Defects on the Yield and Gate Oxide Reliability of SiC Power MOSFETs[C]// 2021 IEEE 8th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA 2021). Redondo Beach, California, USA: IEEE, 2021: 5-8.
- [41] 李诚瞻, 周才能, 秦光远, 等. 轨道交通碳化硅器件研究进展[J]. 电子与封装, 2022, 22(6): 13-26.
- LI C Z, ZHOU C N, QIN G Y, et al. Recent Advances in SiC Devices for Railway Traction[J]. Electronics &

Packaging, 2022, 22(6): 13-26.
[42] European Center for Power Electronics e.V. (EPCE). ECPE Guideline AQG 324: Qualification of Power Modules for Use in Power Electronics Converter Units in Motor Vehicles [EB/OL]. (2019-5-15) [2024-8-27]. <https://wds-service-1258344699.file.myqcloud.com/20/9527/pdf/1628091899939c796936d770f65d3.pdf>.

[43] TOMINAGA T, HINO S, MITSUI Y, et al. Superior Switching Characteristics of SiC-MOSFET Embedding SBD [C]// 2019 31st International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). Shanghai, China: IEEE, 2019: 27-30.

(责任编辑 白夜)

修改稿收到日期为2024年8月27日。

2025年《汽车技术》专项征稿启事

尊敬的汽车及相关技术领域专家学者、研发工程师、高校师生:

随着汽车技术的飞速发展,2025年将见证多项关键技术的突破与应用。《汽车技术》杂志作为中国汽车行业的核心学术期刊,特此发布2025年专项征稿启事,聚焦以下十大技术征稿方向,以期推动汽车技术的创新与进步。

- 多模态大模型在自动驾驶感知决策中的应用:**研究多模态大模型技术推动自动驾驶感知决策能力的创新突破。
- 跨域融合智能芯片技术:**研究跨域融合智能芯片在汽车智能化控制系统中的应用,以及其对性能协同的影响。
- AI赋能的合成数据在自动驾驶研发中的应用:**研究利用AI技术生成合成数据,解决自动驾驶数据短缺问题。
- AI大模型在智能座舱中的多模态交互技术:**研究AI大模型如何整合视觉、听觉、触觉等多种感官信息,实现更加自然和直观的人机交互体验。
- C-V2X技术在车路云一体化中的应用:**研究C-V2X技术如何支持车路云一体化,包括车车通信(V2V)、车路通信(V2I)、车云通信(V2N)等关键技术的发展和应用。
- 智能底盘新构型及集成控制技术:**研究智能底盘线控化、分布式驱动、动底盘融合控制、智能底盘与自动驾驶融合控制等关键技术。
- 新能源乘用车百公里行驶电耗降低技术:**研究如何通过硬件创新和软件优化降低电耗,提升整车续航里程。
- 固态电池电解质材料创新与界面工程优化:**研究氧化物、硫化物、聚合物等固态电解质材料的最新研究进展,以及固态电池中电极与电解质之间的界面问题,提高电池的充放电效率和循环稳定性。
- 电池系统安全技术:**研究主被动一体化的热安全防护、热失控早期火灾探测预警、灭火装置等。
- 高效高密度电驱动总成技术:**研究具有更高转速、更高效率和更小型化的电驱动系统技术。

征稿要求:

- 投稿请注明“*****”技术方向专项征稿字样,本刊对符合征稿方向的稿件将优先审核,一经录用优先发表;
- 文章字数控制在6 000-8 000字范围之内;
- 请按科技论文要求撰写文章摘要,摘要中文字数控制在180字左右;
- 文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献,并在文中标注文献引用处;
- 文章主要作者应提供其简介,包括出生年、性别、职称、学历、研究方向及技术成果等;
- 来稿的保密审查工作由作者单位负责,确保署名无争议,文责自负;
- 请勿一稿多投;
- 本刊使用网站投稿,详细投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏的“作者指南”,网址:<http://qejc.cbpt.cnki.net>。

这些技术方向反映了汽车技术领域的最新研究热点,《汽车技术》杂志诚邀广大科研人员围绕这些方向投稿,我们期待您的佳作,共同推动汽车技术的发展与创新。感谢您对《汽车技术》杂志的支持与贡献!

《汽车技术》杂志是中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车前瞻与应用技术类月刊,为我国高质量科技期刊分级目录入选期刊、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国核心学术期刊(A)、Scopus数据库收录期刊、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)收录期刊、日本科学技术振兴机构数据库入选期刊、EBSCO学术数据库收录期刊、欧洲学术出版中心(EuroPub)数据库收录期刊。

《汽车技术》编辑部