

高功率密度车用塑封碳化硅功率模块的研制

刘俊杰¹, 黄怀晶², 郝凤斌^{2,3}, 柏松^{1,3}

(1. 中国电子科技集团公司第 55 研究所, 江苏 南京 210016;

2. 扬州国扬电子有限公司, 江苏 扬州 225100;

3. 宽禁带半导体器件与集成技术全国重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要:功率模块是电力电子技术领域的核心元器件,在电能变换和电力驱动领域发挥重要作用,在电网输送和新能源汽车电力驱动方面具有广阔应用前景。本文采用先进封装工艺研制了全国产塑封碳化硅(SiC)功率模块,常温下,在通流 600 A 下导通电阻为 2.03 m Ω ,开通损耗为 25.5 mJ,关断损耗为 43.4 mJ;高温 175 $^{\circ}\text{C}$,在通流 600 A 下导通电阻为 3.52 m Ω ,开通损耗为 22.4 mJ,关断损耗为 45.5 mJ,展现卓越的高温特性;模块的功率回路寄生电感仅 16 nH,有效降低了关断过程的电压过冲。得益于优异的模块参数,800 V 母线电压下,模块轻松实现 550 A 出流能力,具有高功率密度、低导通电阻和低寄生电感的特点。

关键词:功率模块; 导通电阻; 开通损耗; 关断损耗; 寄生电感

中图分类号: TN342

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2025)12-0137-06

Development of High-power Density Automotive Plastic Sealing Silicon Carbide Power Module

Liu Junjie¹, Huang Huaijing², Hao Fengbin^{2,3}, Bai Song^{1,3}

(1. The 55th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210016, China; 2. Yangzhou Guoyang Electronics Co., Ltd., Yangzhou 225100, China; 3. National Key Laboratory of Wide Bandgap Semiconductor Devices and Integration Technology, Nanjing 210016, China)

Abstract: Power modules are core components in the field of power electronics technology, playing an important role in energy conversion and power drive. They have broad application prospects in power grid transmission and new energy vehicle power drive. This paper uses advanced packaging technology to develop a nationally produced plastic encapsulated silicon carbide (SiC) power module. At room temperature, under a current of 600 A, the on resistance is 2.03 m Ω , the turn on loss is 25.5 mJ, and the turn off loss is 43.4 mJ. At a high temperature of 175 $^{\circ}\text{C}$, under a current of 600 A, the on resistance is 3.52 m Ω , the turn on loss is 22.4 mJ, and the turn off loss is 45.5 mJ, demonstrating excellent high-temperature characteristics. The parasitic inductance of the power circuit of the module is only 16 nH, effectively reducing the voltage overshoot during the shutdown process. Benefiting from the excellent module parameters, the module can easily achieve a 550 A output capacity under the 800 V bus voltage, show the characteristics of high power density, low on resistance, and low parasitic inductance.

Keywords: power module; on resistance; turn on loss; turn off loss; parasitic inductance

1 引言

以 SiC 为代表的第 3 代半导体的材料具有显著优势,与传统硅基半导体相比,其禁带宽度为硅的 3 倍,导热系数为硅的 3 倍,临界击穿电场强度是硅的近 9 倍^[1-2],器件性能具有导热性能优异、耐高压工作和高开关速度的产品优势。随着新

能源汽车对高压和高温的需求不断提升,传统的硅基封装的功率模块已经无法满足车用功率模块需求。

由近几年的市场调研发现,功率模块行业随着 SiC 材料优势被逐步发掘正经历迅速发展,整体趋势分为由传统硅基封装的 IGBT 模块转向以 SiC MOSFET 封装升级转型研究和针对车用高功率密度的新型封装技术研究^[3-6]。首先对传统硅基封装进行优化升级,其技术路线相对比较保守,难以真正发挥 SiC 模块高频高温性能^[7]。业内

定稿日期: 2025-07-01

江苏省重点研发计划(BE2022048-2);江苏省科技计划(BF2024002)

以混合功率驱动器(HPD)封装为代表的新一代封装已逐步进入新能源汽车主驱应用。其次是面向更高功率模块的新型封装技术研究,其研发周期长且技术瓶颈多,业内对于降热阻和降寄生电感两大难题持续努力。由于SiC栅电荷和结电容低且模块工作过程中电压电流变化率是传统硅基模块的近十倍,所引发的技术难题包括关断过程的电压过冲会导致模块击穿失效和引发剧烈的电磁干扰。此外由于SiC芯片的尺寸更小,且单颗芯片承载量约100 A,为了提高模块的电流等级就需要并联多颗芯片,在大电流工况下产生的焦耳热对模块的可靠性提出了更高的要求。目前对SiC功率模块研制难题的解决思路为降寄生电感设计和降热阻设计,降寄生电感所采用的技术方案包括降低回路各部分自感和利用回路互感抵消;降热阻所采用的技术方法包括设计更大扰流面积的pin-fin底板和更高导热系数的绝缘衬底材料^[8-10]。

基于此,本文面向新能源汽车主驱控制器用800 V功率平台成功研制全国产塑封六合一SiC功率模块,基于多芯片并联且多通道过流关键封装设计技术,研制模块出流能力稳定且散热性能优异,展现出卓越的电力电子开关元器件性能。

2 塑封功率模块研制工作

本文研究内容围绕模块研制和性能测试展开,封装选材关键参考与SiC芯片相近的热膨胀系数,主要是为了减少因热膨胀差异导致的可靠性问题,可有效规避车用工况下热应力影响和保证模块的结构稳定性。单相单桥臂选型并联8颗南京电子器件研究所研发的新一代1 200 V/16 mΩ SiC MOSFET芯片,采用以纳米银烧结和芯片顶部系统铜线键合为代表的先进封装工艺,保证模块的优异开关性能和封装技术优势。首先在高导热的Si₃N₄绝缘陶瓷基板上印刷银膏完成芯片-基板互联;其次将预涂敷银层的铜箔贴装芯片正面完成源极铜线键合互联,再次将5 mil铝线将芯片栅极、开尔文源极进行采样信号互联,接着进行端子框架焊接和单相半桥模块塑封,最后将3个塑封后的半成品模块通过锡基软焊料焊接至具有高效散热能力的pin-fin底板。至此完成了模块研制的基本工序。

本文研制的SiC功率模块的基本结构为单面液冷塑封,成品模块如图1所示,电路拓扑结构为三相全桥拓扑,可以满足在母线电压1 200 V,通流能力稳定达到600 A,由于本文塑封模块的外形尺寸为150 mm×80 mm×14 mm,传统HPD外壳注胶封装外形尺寸为154 mm×92 mm×17 mm,在同等1 200 V/600 A电参数等级下,功率模块体积显著减小约30%,其功率密度显著提升。

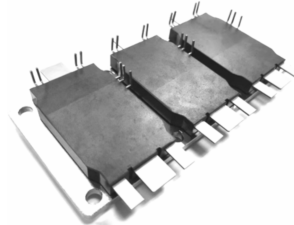


图1 塑封功率模块实物图

Fig. 1 Plastic sealing power module graph

3 功率模块性能测试

本节介绍了模块的性能测试,包括最大值、动静态测试。通过性能测试可以有效评估模块的安全工作区(SOA),其主要由最大漏极电流 I_{Dmax} 、最大漏极-源极电压 U_{DSmax} 、最大耗散功率 P_{Dmax} 、二次击穿限制线 $U_{BR(DSS)}$ 线段组成。功率模块应用时需要确保工作点始终位于SOA内,避免模块失效。

3.1 静态测试

本文对1 200 V/600 A SiC MOSFET功率模块的各项电性能参数进行静态测试,图2为模块输出特性曲线,表1为结温 T_j 为25 °C和175 °C模块具体参数对比(条件为: $I_D=184.0$ mA, $U_{DS}=1$ 200 V, $I_D=600$ A, $U_{CS}=22$ V, $U_{CS}=-8$ V, $I_{SD}=600$ A)。由表1可见,在 $T_j=25$ °C下,模块开启的阈值电压 U_{GSh} =2.9 V,最大电压1 200 V下,漏电流 I_{DSS} 仅2.05 μA,在 $T_j=175$ °C下,阈值电压下降至1.97 V,母线电压1 200 V下漏电流为7.29 μA,展现出优异的高温阻断能力,凸显出SiC的宽禁带和耐高压的独特优势。常温下,模块的导通电阻仅为2.02 mΩ,175 °C高温下导通电阻也仅为3.52 mΩ;正温度系数可以保障在多并联芯片模块中芯片自动均流,防止多芯片并联过热失效,同时较低的导通电阻显著降低模块导通损耗,保证了模块的功率输出能力,提升电机控制器效率。

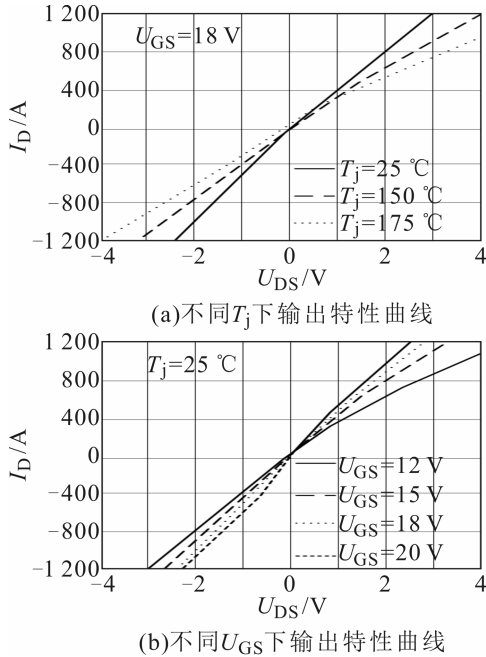


图 2 模块的输出特性曲线

Fig. 2 Output characteristic curves of power module

表 1 SiC MOSFET 功率模块静态测试结果

Table 1 Static test results of SiC MOSFET power modules

$T_j/^\circ\text{C}$	U_{GS}/V	$I_{DSS}/\mu\text{A}$	$R_{DS(on)}/\text{m}\Omega$	I_{GSSF}/nA	I_{GSSR}/nA	U_{SD}/V
25	2.91	2.05	2.02	1.3	0.9	4.36
175	1.97	7.29	3.52	1.9	1.1	3.87

3.2 动态测试

本文利用企业自研低寄生电感平台对模块进行双脉冲测试,测试原理如图 3 所示^[11-12]。施加在模块母线电压为 800 V,感性负载为 26 μH ,测试不同过电流能力情况下其开通关断的功率开关器件性能,以更好评估模块的动态性能。

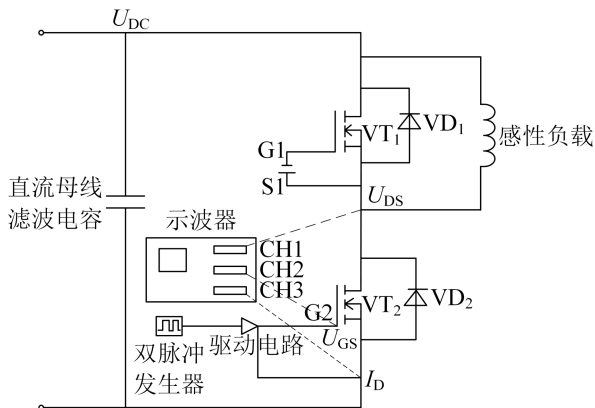


图 3 SiC 功率模块双脉冲测试原理图

Fig. 3 Schematic diagram of double-pulse test of SiC power module

3.2.1 开关测试

根据表 2、3 和图 4、5 所示的开关测试数据和波形可以看出,无论在额定电流下还是最高电流下,本文所述 SiC 功率模块均体现出极低的开关损耗,同时在最大电流 850 A 测试条件下,关断电压过冲为 1 079 V,远低于额定 1 200 V 耐压值,计算功率回路寄生电感 L_s 仅为 16 nH,远低于传统 HPD 模块 27 nH 的回路电感。

表 2 功率模块开通参数

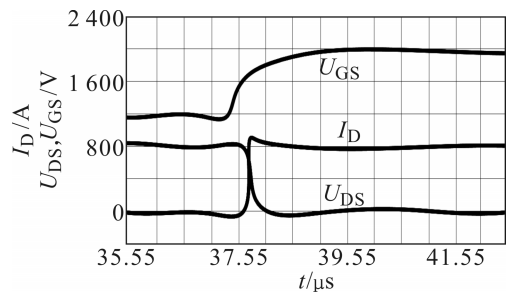
Table 2 Turn-on parameters of power module

I_D/A	功率模块开通动态参数				
	T_{don}/ns	T_f/ns	E_{on}/mJ	$di/dt/(\text{A}/\mu\text{s})$	$du/dt/(\text{V}/\mu\text{s})$
600	120.0	56.0	25.474	11 600	6 400
850	125.2	68.0	32.839	13 900	5 400

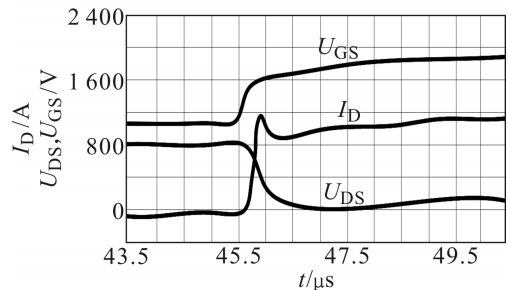
表 3 功率模块关断参数

Table 3 Turn-off parameters of power module

I_D/A	功率模块关断动态参数					
	$T_{\text{doff}}/\text{ns}$	T_r/ns	E_{off}/mJ	$di/dt/(\text{A}/\mu\text{s})$	$du/dt/(\text{V}/\mu\text{s})$	U_{DS_peak}/V
600	334.0	44.8	43.3	14 500	11 000	1 038
850	315.6	48.8	63.3	17 500	12 000	1 079



(a) 导通电流 600 A

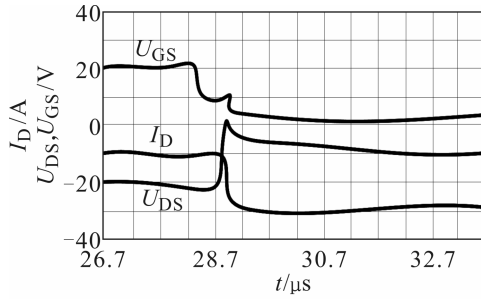


(b) 导通电流 850 A

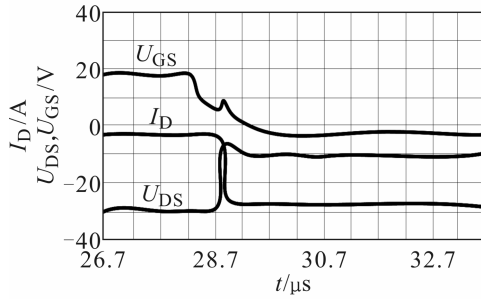
图 4 功率模块开通波形

Fig. 4 Turn-on waveforms of power module

本实验对研制模块在不同温度下的开关参数进行对比,根据表 4 和表 5 的研究结果发现: 175 $^\circ\text{C}$ 结温下,开通时间和开通损耗分别为 173.2 ns



(a) 导通电流 600 A



(b) 导通电流 850 A

图 5 功率模块关断波形

Fig. 5 Turn-off waveforms of power module

和 23.4 mJ, 关断时间和关断损耗分别为 87.3 ns 和 42.5 mJ, 几乎不受温度影响, 甚至略有下降, 关断过冲电压也有所下降, 体现出极佳的高温特性, 显著提升 SiC 功率模块高温性能表现。

表 4 不同 T_j 下功率模块开通参数对比

Table 4 Comparison of power module turn-on parameters under different T_j

I_D/A	$T_j/^\circ C$	开通测试				
		T_{don}/ns	T_f/ns	E_{on}/mJ	$di/dt/(A/\mu s)$	$du/dt/(V/\mu s)$
600	25	120.0	56.0	25.4	11 600	6 400
600	175	118.8	54.4	23.4	13 600	7 900

表 5 不同 T_j 下功率模块关断参数对比

Table 5 Comparison of power module turn-off parameters under different T_j

I_D/A	$T_j/^\circ C$	关断测试					U_{DS_peak}/V
		T_{off}/ns	T_f/ns	E_{off}/mJ	$di/dt/(A/\mu s)$	$du/dt/(V/\mu s)$	
600	25	334.0	44.8	43.3	13 500	11 000	1 038
600	175	356.0	44.8	42.5	13 500	11 000	1 020

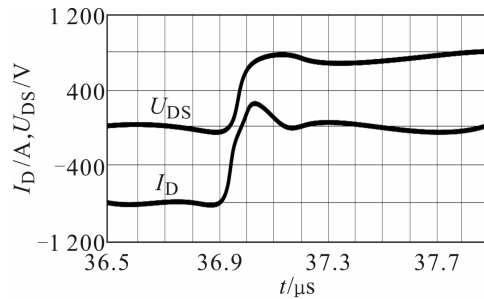
3.2.2 反向恢复测试

除了极低的导通损耗和开关损耗, SiC 模块几乎可以忽略不计的极低反向恢复也是其展现优势的重要方面, 表 6 为不同芯片结温下模块的反向恢复参数对比。

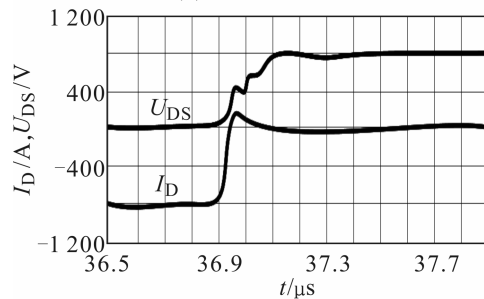
表 6 不同 T_j 下功率模块反向恢复续流参数对比
Table 6 Comparison of the reverse recovery freewheeling parameters of power modules under different T_j

I_D/A	$T_j/^\circ C$	反向恢复续流测试			
		I_{RM}/A	T_{rr}/ns	E_{rec}/mJ	$Q_{rr}/\mu C$
600	25	102	41.2	0.754	7 500
600	175	198	56.8	2.682	6.6

根据表 6 和图 6 的研究结果发现: 随着 T_j 的增加, 反向恢复电流、反向恢复时间、反向恢复损耗等均显著增加, 尽管如此, 反向恢复损耗仍保持在较低的水平。同样得益于较小的寄生电感, 反向恢复波形保持相对缓和的振荡现象, 这也提升了模块的可靠性能^[13]。



(a) 25 °C 反向恢复波形



(b) 175 °C 反向恢复波形

图 6 不同 T_j 下功率模块体二极管反向恢复波形
Fig. 6 The reverse recovery waveforms of the body diode of the power module under different T_j

3.2.3 热阻测试

低热阻设计是本模块研制的重要设计目标。合理的芯片布局、高导热散热材料选型结合散热底板 pin-fin 设计优化, 显著增加由芯片功耗产生的热量向下传输的效率^[14-15]。车用模块热阻测试在进口设备 Mentor 完成, 结果如图 7 所示, 模块的稳态热阻抗 $Z_{th}=0.067$ 1 K/W, 有效保证输出大电流开关过程中的高效散热能力。

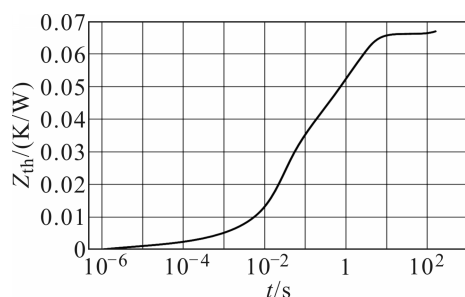


图 7 塑封模块瞬态热阻测试曲线

Fig. 7 Test curve of transient thermal resistance of the encapsulated module

3.2.4 台架温升测试

车规模块的台架温升测试通过无功老化实验完成,在实验前需要在未塑封半成品模块表面喷涂薄层均匀黑漆,待黑模块制作完成后,搭建无功老化实验台,模拟车用工况下的不同电机堵转电流、10 kHz 开关频率和 50% 乙二醇冷却液在 10 L/min 条件下,通过热成像探头显示模块整体发热,可有效评估模块的发热位置是否合理以及 SiC 芯片在所设定的堵转电流下结温小于 175 °C 下是否安全运行。

为了更高匹配新能源汽车逆变器搭载使用,研制模块在 800 V 母线电压下进行台架测试,本文将研制模块与 HPD 模块对比不同堵转电流出流能力如图 8 所示,在各时间内台阶稳定输出 100 A、200 A、300 A、400 A、500 A、550 A。当达到最大输出电流有效值 500 A 时,HPD 模块最高结温已接近 155 °C,限制于芯片结温接近安全临界值出流能力无法提升,但本文研制塑封模块芯片结温仅有 140 °C,远低于额定工作结温 175 °C,在最大输出电流有效值 550 A 下芯片最高结温为 155 °C,相同结温下,出流能力提升 10%,对应控制器输出功率提升 10%,体积减小 30%,功率密度大幅度提升 50% 以上。

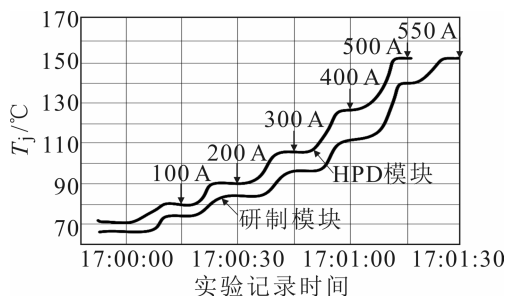


图 8 800 V 台架测试通流曲线

Fig. 8 Flow curves of 800 V bench test

4 结论

本文分析了全国产塑封 1 200 V/600 A 全 SiC 功率模块的制备和性能测试相关工作。分别对模块高低温静态参数、动态参数、热阻、台架进行了充分测试,测试结果充分展示了该模块优异的电学性能,在额定 600 A 电流下,导通电阻为 2.03 mΩ,175 °C 高温下,导通电阻为 3.52 mΩ,并且在常高温下展现几乎不受温度影响的开关特性;结合节到流体热阻为 0.067 1 K/W 极低的热阻属性,该模块可以在 800 V 平台,输出频率 10 kHz 下,轻松实现 550 A 以上的有效值输出,相较于传统 HPD 封装,功率密度提升 50% 以上,展现了卓越的功率输出能力。

参考文献

- [1] 安德列亚斯·福尔克,迈克尔·郝康普.IGBT 模块:技术、驱动和应用[M].韩金刚,译.北京:机械工业出版社,2016.
Andreas Volke, Michael Hornkamp.IGBT Module: Technology, Drive and Application[M].Han Jingang, Trans.Beijing: China Machine Press, 2016.
- [2] Huang Z Z, Chen C, Xie Y, et al. A High-performance Embedded SiC Power Module Based on a DBC-stacked Hybrid Packaging Structure[J].IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(1): 351-366.
- [3] 皇甫宜耿,宋少林,王晓鹏,等.功率模块主动热控制技术综述[J].电源学报,2024,22(3):118-126.
Huangfu Yigeng, Song Shaolin, Wang Xiaopeng, et al. Review of Research on Active Thermal Control Technologies for Power Modules[J].Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 118-126.
- [4] 陈皎,郑亮.基于 Si₃N₄ 陶瓷层的 SiC 功率模块封装结构优化[J].机械研究与应用,2025,38(1):52-55,60.
Chen Jiao, Zheng Liang. Optimization of SiC Power Module Packaging Structure Based on Si₃N₄ Ceramic Layer[J]. Mechanical Research and Application, 2025, 38(1): 52-55, 60.
- [5] 官紫妍,吴丰顺,周龙早,等.功率模块纳米银烧结技术研究进展[J].电子工艺技术,2023,44(4):1-6.
Guan Ziyen, Wu Fengshun, Zhou Longzao, et al. Research Progress of Nano-silver Sintering Technology Applied to Power Modules[J].Electronic Process Technology, 2023, 44(4): 1-6.

- [6] Zhao J W, Dong Y, Liu Y, et al. Research on Multi-module Parallel Current Equalization Technology for High-power Phase Shifting Full-bridge Converters[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2417: 12-21.
- [7] 王来利, 赵成, 张彤宇, 等. 碳化硅功率模块封装技术综述[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(18): 4947-4962.
Wang Laili, Zhao Cheng, Zhang Tongyu, et al. Review of Packaging Technology for Silicon Carbide Power Modules[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(18): 4947-4962.
- [8] 武晓彤, 邓二平, 吴立信, 等. 车规级功率器件的封装关键技术及封装可靠性研究进展[J]. *半导体技术*, 2024, 49(8): 689-701.
Wu Xiaotong, Deng Erping, Wu Lixin, et al. Research Progress on Packaging Key Technologies and Packaging Reliability of Automotive-grade Power Devices[J]. *Semiconductor Technology*, 2024, 49(8): 689-701.
- [9] Evans T M, Le Q, Mukherjee S, et al. PowerSynth: A Power Module Layout Generation Tool[J]. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 2019, 34(6): 5063-5078.
- [10] 闫美存, 张秋. 智能功率模块测试方法研究[J]. *信息技术与标准化*, 2024(4): 47-52, 56.
Yan Meicun, Zhang Qiu. Research on Test Methods of Intelligent Power Modules[J]. *Information Technology & Standardization*, 2024(4): 47-52, 56.
- [11] 侯湘庆, 周献, 李邦彦. 一种IGBT功率模块工程应用型双脉冲测试方法[J]. *绿色科技*, 2022, 24(16): 251-254, 259.
Hou Xiangqing, Zhou Xian, Li Bangyan. A Double-pulse Test Method for Engineering Application of IGBT Power Module[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2022, 24(16): 251-254, 259.
- [12] 樊鑫茹. 基于双脉冲测试的IGBT功率模块失效分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
Fan Xinru. Failure Analysis of IGBT Power Module Based on Double Pulse Test[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [13] Chen H, Zhang Y R, Luo M J, et al. High Temperature Performance of 6 500 V 4H-SiC MOSFET with Embedded Schottky Barrier Diode[C]//2022 6th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference. 2022: 1-10.
- [14] Schmidt R, König C, Prenosil P. Novel Wire Bond Material for Advanced Power Module Packages[J]. *Microelectronics Reliability*, 2012, 52(9/10): 2283-2288.
- [15] Hou F Z, Wang W B, Cao L Q, et al. Review of Packaging Schemes for Power Module[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, 8(1): 223-238.

作者简介

刘俊杰(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为半导体器件与可靠性。

E-mail: liujj521@163.com