

高性能碳化硅混合功率模块研制

邵云^{1,2}, 史晶晶^{1,2}, 李诚瞻^{1,2}, 彭勇殿^{1,2}

(1. 电力电子器件湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412001; 2. 株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 报道了一种基于自主封装技术的高性能、高效率碳化硅 (SiC) 混合功率模块, 该功率模块的反向阻断电压为 1 200 V, 正向导通电流为 480 A。动态测试表明, 其峰值反向恢复电流 I_{rr} 仅为 -115 A, 关断延迟时间 $t_{d(off)}$ 为 3.36 μ s, 关断能量损耗 E_{off} 为 296.82 mJ, 开通延迟时间 $t_{d(on)}$ 仅为 0.66 μ s, 开通能量损耗 E_{on} 仅为 242.27 mJ, 输出功率可达到百千瓦级别。与传统的硅基 IGBT 模块相比, 该碳化硅混合功率模块大大降低了模块的能量损耗。

关键词: SiC SBD; IGBT; 混合功率模块; 能量损耗

中图分类号: TN7

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2013)02-0005-03

Development of High Performance SiC Hybrid Power Module

SHAO Yun^{1,2}, SHI Jing-jing^{1,2}, LI Cheng-zhan^{1,2}, PENG Yong-dian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Power Electronics of Hunan Province, Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: A high performance and high efficiency SiC hybrid power module with our independently designed package technique is proposed. The reverse blocking voltage of the hybrid module is 1 200 V and the forward current is 480 A. The dynamic characteristic of the SiC hybrid module has been tested, and the results show that the reverse recovery peak current I_{rr} is only -115 A, the turn off delay time $t_{d(off)}$ is 3.36 μ s, the turn-off energy loss E_{off} is 296.82 mJ, the turn-on delay time $t_{d(on)}$ is 0.66 μ s, and the turn-on energy loss E_{on} is 242.27 mJ. Output power of the SiC module will reach to hundreds of kilowatt level. Comparing with conventional Si IGBT power module, SiC hybrid power module will reduce the energy loss greatly.

Key words: SiC SBD; IGBT; hybrid power module; energy loss

0 引言

与传统的 Si 材料相比, 碳化硅 (SiC) 材料具有禁带宽度大、击穿电场强度高和热导率高等优良性能, 这使得 SiC 器件具有更好的高温特性、更高的阻断电压、更低的功耗以及更快的开关速度^[1-3]。近年来, 由于 SiC 材料的日益成熟, SiC 电力电子器件以及基于碳化硅电力电子器件的高功率模块逐渐成为研究和开发的热点。随着 SiC 肖特基二极管等 SiC 电力电子器件的产业化, SiC 功率模块由于其效率更高、系统成本更低, 受到光伏太阳能、电动/混合动力汽车、轨道交通以及现代军

事等各个领域的青睐^[4]。

目前国际上报道的 SiC 功率模块有基于 SiC 肖特基二极管与硅基 IGBT 的混合功率模块和全碳化硅功率模块。2010 年, Chinthavali M. 等人在国际电力电子会议上发表文章, 报道了用于混合动力汽车的全 SiC 功率模块^[5]。2011 年, Nii-Adotei Parker-Allotey 等人比较了 IGBT/Si-PiN 二极管模块和 IGBT/SiC 肖特基二极管模块的通态损耗和开关损耗, 展示了 SiC 肖特基二极管与硅基 IGBT 的混合功率模块在降低损耗方面的优势^[6]。

电力电子器件湖南省重点实验室研制了一种基于 SiC 肖特基二极管与硅基 IGBT 的混合功率模块, 该模块的导通电流为 480 A, 反向阻断电压为 1 200 V, 可应用于光伏太阳能、电动/混合动力汽车等领域。

收稿日期: 2013-02-12

作者简介: 邵云 (1974-), 男, 工程师, 长期从事大功率半导体器件研究与开发工作。

1 器件结构及工艺

SiC 混合功率模块采用的 SiC 肖特基二极管芯片为 Semisouth 提供的 30 A/1 200 V SiC JBS, 采用的硅基 IGBT 芯片为韩国 Magnachip 公司提供的 50 A/1 200 V 芯片。该功率模块共使用了性能高度一致的 16 颗 SiC 肖特基二极管芯片和 16 颗硅基 IGBT 芯片, 并将其平均分配于 4 块 AlN 基的直接覆铜 (DBC) 衬板上。图 1 示出单颗 SiC 肖特基二极管的直流通态特性, 肖特基二极管的正向开启电压为 0.8 V, 在阳极电压为 1.6 V 时, 二极管的导通电流达到 30 A。

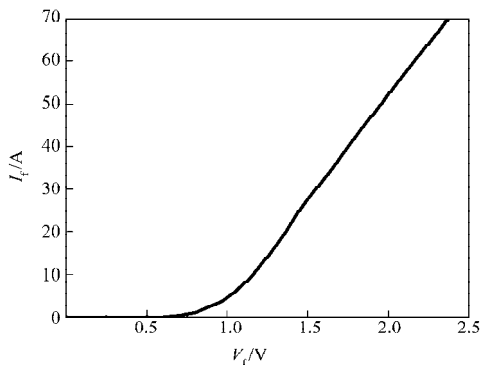


图 1 单颗 SiC 肖特基二极管的直流通态特性

Fig. 1 DC on-state characteristics of SiC diode

采用高温真空焊接的方式将 SiC 肖特基二极管芯片和硅基 IGBT 芯片焊接在 DBC 衬板上, 并检查芯片与 DBC 衬板的焊接粘合度, 保证芯片与衬板之间的孔隙面积低于总芯片面积的 3%。采用超声引线键合的方式实现芯片与芯片之间、芯片与 DBC 衬板之间的电连接, 加强键合过程中的超声强度, 确保金属引线键合点的牢固性。

同样采用高温真空焊接的方式将焊有芯片的 DBC 衬板焊接在 AlSiC 基板上, 并保证衬板与基板之间的孔隙面积低于总衬板面积的 3%。安装母排实现混合功率模块的电接口, 安装 PCB 板实现芯片之间的电连线, 在安装管壳之后向模块内部注入高性能硅胶和环氧树脂实现对功率模块的密封保护和电绝缘。所研制的功率模块如图 2 所示。

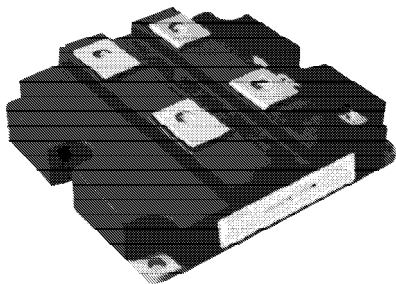


图 2 SiC 混合功率模块

Fig. 2 Appearance of SiC hybrid power module

2 测试结果与讨论

使用 Crea MT100 静态测试台对 SiC 混合功率模块进行静态特性测试, 检验模块内部 SiC 芯片和 IGBT 芯片在经过模块封装工艺之后是否发生电性能退化, 并检验经过电连接后的芯片的均流能力。在室温条件下的测试结果如图 3 所示。

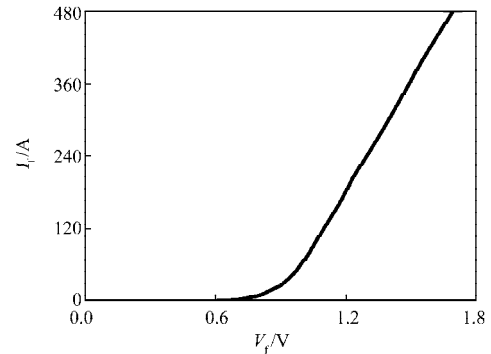
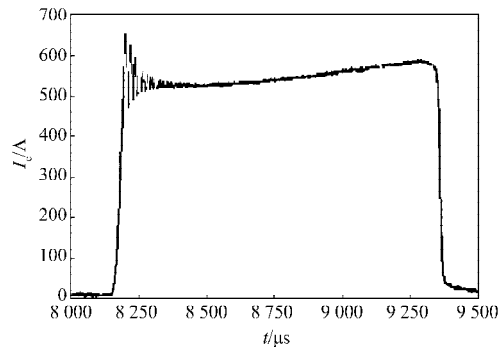


图 3 SiC 混合功率模块中 SiC 肖特基二极管的通态 V-I 特性

Fig. 3 V-I characteristics of SiC diode in the SiC hybrid power module

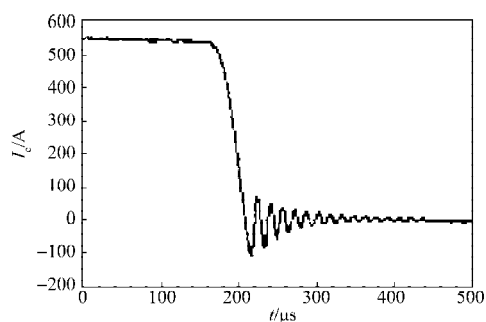
对比图 1 与图 3 的测试结果可知, 混合功率模块中 SiC 肖特基二极管的开启电压为 0.8 V, 与单颗 SiC 肖特基二极管的开启电压完全一致; 同时当外加电压为 1.6 V 时混合功率模块中二极管的导通电流为 480 A, 正好是单颗 SiC 肖特基二极管导通电流的 16 倍。由此可见, 该模块内部 SiC 肖特基二极管的开启特性并未受到器件并联的影响, 很好地实现了各芯片间的均流。

采用 Lemsys 功率模块综合参数测试系统对 SiC 混合功率模块进行动态测试, 模块的测试温度为 125 °C, 模块中 IGBT 的栅极电阻 $R_g = 2.7 \Omega$, 集电极外加电压 $V_{ce} = 600 \text{ V}$, 模块导通电流 $I_c = 550 \text{ A}$, 电流变化速率 $di/dt = 2000 \text{ A}/\mu\text{s}$, 负载为感性, 电感值 $L_{load} = 12 \mu\text{H}$ 。实测的 SiC 混合功率模块的动态特性曲线如图 4 所示, 其中图 4(a) 为功率模块中 IGBT 器件的开关特性, 图 4(b) 为 SiC 肖特基二极管的反向恢复特性。



(a) 开关特性

(a) Switching characteristic



(b) 肖特基二极管反向恢复特性

(b) Reverse recovery characteristic of SiC SBD

图4 SiC混合功率模块的动态特性曲线

Fig.4 Dynamic characteristics of the SiC hybrid power module

由图4(a)可以看出,虽然SiC混合功率模块在开通过程中依然存在一定的过冲尖峰电流,但该过冲电流相对值较小,与稳定导通状态的550 A相比,不会高出90 A,远小于普通硅基IGBT功率模块的;同时可以看出, SiC功率模块的开通延迟时间 $t_{d(on)}$ 仅为0.66 μ s,关断延迟时间 $t_{d(off)}$ 为3.36 μ s。经计算得到, SiC混合功率模块的开通能量损耗 E_{on} 仅为242.27 mJ,关断能量损耗 E_{off} 为296.82 mJ。由图4(b)可以看出, SiC肖特基二极管的反向最大电流 I_r 仅为-115 A,远小于普通硅基续流二极管反向电流,反向恢复电荷 Q_r 仅为66 μ C。但是由于作为续流二极管的SiC肖特基二极管存在较大的反向漏电流,从而使得SiC肖特基二极管在反向恢复过程中存在一定幅度的高频振荡现象,这导致SiC混合功率模块在其导通过程中出现同样频率的高频振荡现象,这种振荡现象可能导致应用该模块的变流装置失效。但随着SiC肖特基二极管性能的提升,反向漏电流减小到毫安数量级,将会消除这种振荡现象。

为了更进一步确定SiC混合功率模块的能量损耗情况,将其与相同封装工艺制备和具有相同电流电压等级的硅基IGBT模块进行比较。IGBT功率模块的IGBT开关芯片和栅极电阻 R_g 均与SiC混合功率模块的一致, IGBT功率模块中的续流二极管为MagnaChip普通硅基快恢复二极管,而SiC混合功率模块中的续流二极管为SiC肖特基二极管。IGBT功率模块和SiC混合功率模块的测试条件完全相同,即在测试温度均为125 $^{\circ}$ C、电阻集电极外加电压 $V_{ce}=1\ 200$ V、电流变化速率 $di/dt=2\ 000$ A/ μ s、负载电感 $L_{load}=12$ μ H的条件下进行测试。图5示出硅基IGBT功率模块和SiC混合功率模块的开通、关断能量损耗情况,普通硅基IGBT功率模块的开通能量损耗 E_{on} 为658 mJ, SiC混合封装模块的开通能量损耗 E_{on} 为242.27 mJ,与前者相比下降了约68.18%。硅基IGBT模块的关断能量损耗 E_{off} 为487.51 mJ, SiC混合封装模块的关断能量损耗

E_{off} 为296.82 mJ,与前者相比下降了约39.12%。由此可以看出,在减小能耗方面, SiC混合功率模块比普通的硅基IGBT功率模块具有更优异的性能。

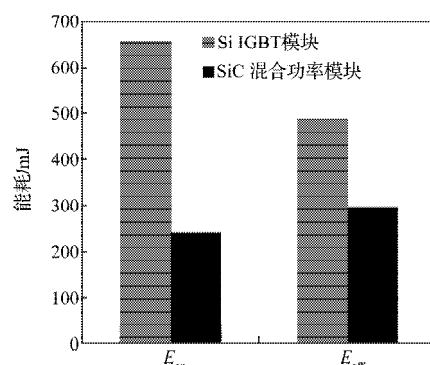


图5 硅基IGBT功率模块与SiC混合功率模块的开通/关断能量损耗

Fig.5 Switching energy loss of the Si-IGBT module and the SiC hybrid power module

3 结语

基于SiC肖特基二极管和硅基IGBT的大功率混合功率模块在国内属首次报道,从开关延时情况和能量损耗等方面看,该功率模块均表现出优异的性能。将该SiC混合功率模块与相同电流电压等级的硅基功率模块进行比较, SiC混合功率模块具有更快的导通速度和更低的开关能量损耗。随着SiC肖特基二极管器件性能的提升, SiC混合功率模块的性能将进一步优化,应用领域不断拓展,逐步展现其性能优势。

参考文献:

- [1] Hesam M, Subhashish B, Sei-Hyung R, et al. Design Comparison of 6.5 kV Si-IGBT, 6.5kV SiC JBS Diode, and 10 kV SiC MOSFETs in Megawatt Converters for Shipboard Power System[C]//IEEE ESTS, 2011:248-253.
- [2] Wesley T C, Dimeji I, Damian U, et al. Development of a 15 kV Bridge Rectifier Module Using 4H-SiC Junction-barrier Schottky Diodes[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(4):1137-1142.
- [3] Michael J P, Wayne J R, Autry T, et al. Silicon Carbide Power Modules for High-Temperature Applications[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2012, 2(2): 208-216.
- [4] Ning Puqi, Wang Fred, Ngo Khai D T. High-Temperature SiC Power Module Electrical Evaluation Procedure[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3079-3083.
- [5] Chinthavali M S, Tolbert L M, Zhang Hui, et al. High Power SiC Modules for HEVs and PHEVs[C]//2010 International Power Electronics Conference, 2010: 1842-1848.
- [6] Parker-Allotey N, Alatisse O, Hamilton D, et al. Conduction and Switching Loss Comparison Between an IGBT/Si-PiN Diode Pair and an IGBT/SiC-Schottky Diode Pair[C]// 2011 2nd IEEE PES International Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2011:1-6.