

开发应用

1700V SiC JBS 混合 IGBT 模块研制

冯科 杨晓菲 王昭 曹琳

(电力电子产品开发部,陕西 西安 710016)

摘要 SiC JBS 作为单载流子模块,没有反向恢复特性,因此具有高开关频率的特性。本文中采用 SiC JBS 代替 Si 二极管作为 IGBT 模块中的续流二极管,可以显著减少 IGBT 模块的开关损耗,提高了模块开关频率。由于没有电流和电压的过冲,提高了模块的可靠性。

关键词 SiC(碳化硅) JBS(肖特基势垒二极管) IGBT 混合模块 低开关损耗

0 引言

IGBT 结合了双极性晶体管的输出特性及 MOS-FET 驱动简单的特点,拥有输出功率大、开关频率高的特性,成为了高压大功率开关的最佳选择,主要应用于轨道牵引控制变流器、电机控制变流器、不间断电源、焊接设备、电力转换等领域。

在 IGBT 开通过程中,续流二极管关断过程中存在反向恢复电流和反向恢复电压,该电流和电压直接作用在 IGBT 的开通瞬间,增加了模块的开通损耗,同时过冲的电流和电压容易造成 IGBT 失效。二极管的反向恢复电流和电压还会随着工作温度、二极管电流和 di/dt 的增加而增加。

肖特基势垒二极管(JBS)是一种单极性模块,没有反向恢复电流^[1],用来替换传统二极管作为续流二极管可以大大的减小 IGBT 开通的瞬时损耗,同时减小 IGBT 开通时的电流、电压过冲。但是 Si 材料的 JBS 最高耐压通常只有 200V,不能满足高压大功率应用需求,SiC 材料相对于 Si 材料具有更高的临界击穿场强^[2],因此 SiC JBS 的耐压可以很高,非常适合高压大功率领域的应用。

1 混合 SiC 模块结构

IGBT 混合模块的结构主要包括底板、外壳、顶盖、电路板、电极、子单元等几大部件,其中子单元包括 DBC 基板、芯片、键合线等主要部件。各个部件之间的连接技术构成了 IGBT 模块封装的关键技术。为了提高模块的可靠性,要求各部分材料的热膨胀系数相匹配,散热特性好及连接界面尽量少且连接牢固,1700V/1200A SiC 模块外形如图 1 所示。

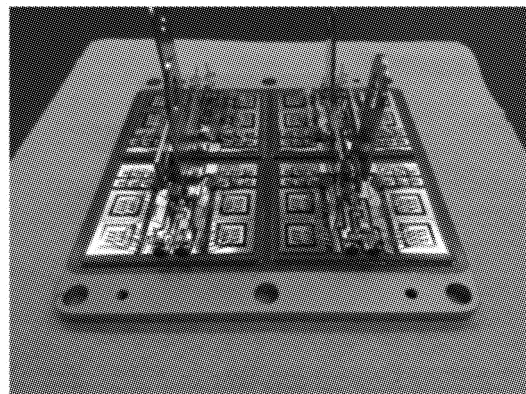


图1 混合 SiC 模块外形结构图

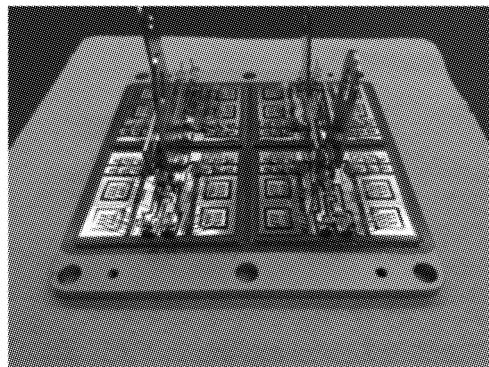


图2 混合 SiC 模块内部结构

混合模块内部结构如图 2 所示,采用 AlN 陶瓷材料的 DBC 基板,可降低模块热阻,同时热膨胀系数更接近于芯片材料,有利于可靠性的提高。底板采用 AlSiC 材料,其拥有高强度、低密度、热膨胀系数接近芯片材料的优点,适合于大功率环境下应用。

利用有限元分析法对模块的热分布进行仿真,得到优化的芯片布局结构,模型图及 IGBT 混合模块的热分布图如图 3 所示。底板采用水冷方式散热,

对芯片施加功率,观测热分布情况,结果显示热分布合理,满足模块散热要求。

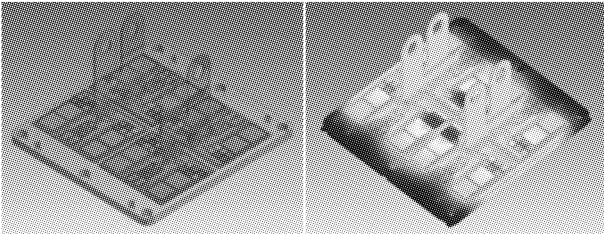


图3 模块热分布

2 测试分析

对封装完成的混合 SiC 模块进行静态、动态测试,并与 1700V/1200A 的传统 IGBT 模块的测试结果进行比较,测试结果如表 1 所示。

测试结果显示混合 SiC 模块在二极管的反向恢复特性方面有着优异的表现,使得混合模块在恢复电荷、恢复能量及恢复电流尖峰方面显著降低。

表 1 混合 SiC 模块测试结果与对比

符号	测试条件		SiC 混合 模块	传统 IGBT 模块	单位
V_F	$I_F = 1200A$	$T_{vj} = 125^\circ C$	2.3	1.8	V
I_{rr}	$V_{CC} = 900V$ $I_C = 1200A$	$T_{vj} = 125^\circ C$	100	750	A
Q_{rr}	$V_{GE} = \pm 15V$ $R_G = 2.2\Omega$	$T_{vj} = 125^\circ C$	11	395	μC
t_{rr}	$L_s = 280nH$	$T_{vj} = 125^\circ C$	0.17	0.95	μs
E_{rec}	感性负载	$T_{vj} = 125^\circ C$	5.9	320	mJ

混合 SiC 模块的二极管的恢复时间 t_{rr} 远低于传统 IGBT 模块,混合 SiC 模块的恢复能量 E_{rec} 只有传统 Si 模块的 2%,恢复电流 I_{rr} 只有 12%。

如图 4 和图 5 分别是混合 SiC 模块和传统 Si 模块的二极管恢复特性对比,从图中可以看出混合 SiC 模块的二极管反向恢复电流几乎看不到,而传统 Si 模块的二极管反向恢复电流有明显的尖峰。反向恢复电流不但会产生很大的动态损耗,同时会叠加在 IGBT 开通的瞬间,导致 IGBT 开通时产生电流过冲及电压过冲,也正因此,IGBT 模块在使用时需要留出更多的裕量,以保护 IGBT 模块不会损坏。因此混合 SiC 模块的使用可以减少这部分裕量的要求,同样规格的模块,混合 SiC 模块可以运行在更高的电流工况下。

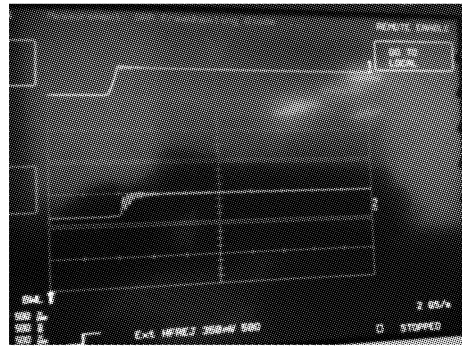


图4 混合模块二极管恢复特性曲线



图5 普通 Si 模块二极管恢复特性曲线

对比相同运行工况 ($V_{CE} = 1700V$ 、 $I_C = 800A$ 、 $\cos\theta = 0.99$ 、 $f = 1000Hz$) 下混合 SiC 模块和传统 Si 模块的二极管损耗情况。

传统模块二极管通态损耗:

$$P_{DSI} = I_C \times V_F \times \left(\frac{1}{8} - \frac{D}{3\pi} \times \cos\theta \right) = 800 \times \sqrt{2} \times 1.8 \times \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{3 \times 3.14} \times 0.99 \right) = 38W$$

混合 SiC 模块二极管通态损耗:

$$P_{DSIC} = I_C \times V_F \times \left(\frac{1}{8} - \frac{D}{3\pi} \times \cos\theta \right) = 800 \times \sqrt{2} \times 2.3 \times \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{3 \times 3.14} \times 0.99 \right) = 48.6W$$

传统模块二极管开关损耗:

混合 SiC 模块二极管开关损耗:

$$P_{DSI-sw} = \frac{E_{rec}}{\pi} \times f_{pwm} \times \frac{320 \times 10^{-3}}{3.14} \times 1000 = 101.9W$$

混合模块二极管开关损耗:

$$P_{DSIC-sw} = \frac{E_{rec}}{\pi} \times f_{pwm} = \frac{5.9 \times 10^{-3}}{3.14} \times 1000 = 1.9W$$

传统二极管总功耗为:

$$P_{D-si} = P_{DSI} + P_{DSI-sw} = 38 + 101.9 = 139.9W$$

混合 SiC 模块二极管的总损耗为:

$$P_{D-sic} = P_{DSIC} + P_{DSIC-sw} = 48.6 + 1.9 = 50.5W$$

由上边的计算结果可以看到,混合 SiC 模块由于二极管通态压降较大,导致其通态损耗会大一些,

但是其动态损耗只有传统二极管的 1.9%,因此混合 SiC 模块的二极管的总功耗只有传统模块的 36.1%,较小的功耗在节能的同时还会使得混合 SiC 模块的工作温度降低,从而提高了模块的可靠性,同时结合没有过冲的电流和电压,进一步提高了混合 SiC 模块的可靠性。

3 结语

由于 SiC JBS 二极管的优良特性,恢复时间远远低于传统模块,在相同散热条件下混合 SiC 模块可以工作在更高频率。

混合 SiC 模块由于其二极管的反向恢复电流和恢复能量几乎可以忽略,使得混合 SiC 模块的总体

损耗显著降低,同时降低了模块运行时的温度。没有了二极管的电流、电压的过冲现象,提高了 IGBT 开通瞬间的可靠性,同时使得混合 SiC 模块实际应用时可以工作在更高的电流和电压的工况条件下,因此混合 SiC 模块在大功率领域应用有着明显的优势。

参考文献

[1] Min - Sub Lee, Jun - Ho Lee. New Intelligent Power Module with Silicon Carbide Diode. 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia. 2011.5.

[2] Shigeru Hasegawa, Kazuhiro Morishita. 1.7kV Hybrid SiC Power Module with Large Current Capacity and Low Power Loss. TECHNICAL REPORTS. 2013.9.