

大电流下 SiC MOSFET 模块的暂态温度特性研究

李占涛, 陆海峰

(清华大学 电机系, 北京 100084)

摘要: 由于碳化硅(SiC)的材料特性,在极端温度下,碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管(SiC MOSFET)相对传统硅基器件有突出优势。目前对 SiC MOSFET 暂态温度特性的研究,主要以单管小电流实验为主,大电流下暂态温度特性的研究还不充分。为分析和验证大电流下暂态温度这一特性,在理论分析的基础上,以 CREE 1 200 V/300 A 半桥 SiC MOSFET 模块为研究对象,通过双脉冲测试平台研究 SiC MOSFET 模块及其驱动电路在不同温度环境下的暂态性能。对比分析了不同温度下开关时间、开关损耗、电应力及电流、电压过冲的差异,实验结果对 SiC MOSFET 模块在大电流下的选型和驱动设计具有一定的参考意义。

关键词: 碳化硅(SiC);金属氧化物半导体场效应晶体管(SiC MOSFET);温度特性;模块;大电流

中图分类号: TN32

文献标识码: A

DOI: 10.19457/j.1001-2095.dqed20957

Research on Temperature Dynamic Characteristics of SiC MOSFET Module with High Current

LI Zhantao, LU Haifeng

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Due to the superior material properties of the silicon carbide(SiC), SiC metal-oxide semiconductor field effect transistor(MOSFET) have prominent advantages over silicon based devices at extreme temperatures. At present, the experiment researches on temperature dynamic characteristics of SiC MOSFET are focused on low current level, the researches on dynamic characteristics of the module at high current level are not enough. To test and analyze the characteristics on the high current level, besides necessary theoretical analysis, the double pulse test experiment based on the CREE 1 200 V/300 A half bridge module was carried out. The dynamic characteristics of the SiC MOSFET module and its gate driver were tested at different temperatures. The parameters including switching time, switching losses, electrical stress, overshoot of the current and voltage (di/dt and dv/dt) at different temperatures were compared and analyzed. The results of the research are useful for the selection and driver design of SiC MOSFET module on high current level.

Key words: silicon carbide(SiC);metal-oxide semiconductor field effect transistor(SiC MOSFET);temperature characteristics;module;high current

随着宽禁带器件研究的逐步发展,基于 SiC 尤其是 SiC MOSFET 的电力电子器件,正在得到越来越广泛的应用。由于 SiC 材料本身具有更高的禁带宽度,击穿场强和热导系数, SiC 基器件相对 Si 基器件在通态损耗、开关速度、工作温度等方面表现出明显的优势,可以满足更广泛的应用需求^[1-2]。其中,在极端温度下的应用已成为 SiC MOSFET 的重要研究方向,而对 SiC MOSFET 温度特性的研究就显得尤为重要。

近些年来,国内外诸多学者都对 SiC MOS-

FET 的温度特性进行了研究。国内主要有文献[3]针对 1 200 V/36 A 单管 SiC MOSFET 在 25~150 °C 温度条件下对开关延时、开关损耗进行了测定。文献[4]对 1 200 V/40 A 单管 SiC MOSFET 的阈值电压、跨导、通态电阻等静态参数进行了测定,测试温度条件为 25~150 °C。国外文献中的研究相对更加完备。文献[5]对动态和静态参数进行了综合测量,测试温度达到 200 °C。文献[6-7]则对低温下的参数也进行了测试,测试温度条件为 -100~200 °C,并对结果进行了分析。文献[8-9]

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0102300)

作者简介: 李占涛(1997—),男,本科,Email:li-zt18@mails.tsinghua.edu.cn

在改变温度的同时,对门极电阻、负载电流都进行了不同工况下的动、静态参数对比,并在实际的DC-DC变换器中也进行了测试。

已有的工作对高低温环境下的动、静态参数都有了完备的测试结果,但之前的工作大多采用单管进行测试,负载电流都没有超过50 A。但实际上,大功率模块的电流远不止50 A,以CREE的CAS300M12BM2半桥模块为例,其标准为1 200 V/300 A。而在模块大电流的工况下,温度特性尤其是暂态特性的相关工作做的还不够。除此之外,先前实验中,以高温为例,多采用热盘对SiC MOSFET加热的方式,只有SiC MOSFET的壳体与热盘接触时,测试环境才相对开放。而实际的控制中,驱动板等外围电路与功率器件共同存在于密闭壳体中,这样的测试和实际工况有一定的差距。

针对以上两点问题,本文选用CREE公司的1 200 V/300 A半桥模块CAS300M12BM进行测试,将整个双脉冲实验平台,包括驱动板,置于密闭温箱内,在不同温度下进行了电流等级较高的双脉冲测试,记录不同温度下暂态特性。

1 理论分析与测试方法

1.1 暂态温度特性的理论分析

在进行实验测试前,对SiC MOSFET暂态过程中的主要参数随温度变化的特性在理论上给出分析。首先,温度变化直接影响的是载流子的本征激发,具体来讲,随温度增加,本征载流子的浓度会逐渐增大,而本征载流子影响阈值电压的变化。阈值电压 V_{th} 的表达式为

$$V_{th} = \frac{\sqrt{4\varepsilon_s k T N_A \ln(N_A/n_i)}}{C_{ox}} + \frac{2kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad (1)$$

式中: ε_s 为相对介电常数; k 为玻尔兹曼常数; T 为温度; N_A 为掺杂浓度; n_i 为本征载流子浓度; C_{ox} 为氧化层电容; q 为单位电荷量。

由式(1)可知,随着温度升高和本征载流子浓度的增大,SiC MOSFET的阈值电压会随之降低。这一结论在文献[6]中给出实验证明。

温度的变化除了影响本征载流子浓度之外,还对电子迁移率有影响。文献[10]中指出,在600 K以下,温度升高,界面态散射迁移率增加,反型沟道电子迁移率 μ_{ni} 增加。SiC MOSFET中,跨导 G_m 代表栅极电压对漏极电流的控制能力,与反型沟道电子迁移率有关,其表达式为

$$G_m = \frac{Z\mu_{ni}C_{ox}}{L_{CH}} (V_{GS} - V_{th}) \quad (2)$$

式中: Z 为沟道宽度; μ_{ni} 为反型沟道电子迁移率; L_{CH} 为沟道长度; V_{GS} 为栅极电压。

由式(2)可知,随温度升高,反型沟道电子迁移率增大,跨导随之增大。跨导对于暂态特性的影响,直接体现在米勒电压上,表达式为

$$V_{plate} = I_L/G_m \quad (3)$$

式中: V_{plate} 为米勒平台电压; I_L 为负载电流,感性负载下可视为不变。

综合式(1)~式(3)的理论分析,温度升高,阈值电压降低,米勒平台电压降低。这两个参数直接影响开通和关断速度。以开通过程电压下降时间 t_{vf} 和关断过程电压上升时间 t_{vr} 为例,表达式为

$$t_{vf} = Q_{gd} R_g / (V_{driveon} - V_{plate}) \quad (4)$$

$$t_{vr} = C_{iss} R_g \ln\left(\frac{V_{th} - V_{driveoff}}{V_{plate} - V_{driveoff}}\right) \quad (5)$$

式中: Q_{gd} 为开通过程中对米勒电容的充电电荷; R_g 为门极电阻; $V_{driveon}$ 为正向驱动电压,对SiC MOSFET一般为20 V; $V_{driveoff}$ 为负向驱动电压,一般为-5 V; C_{iss} 为输入电容。

由式(4)可知,温度升高, V_{plate} 降低,开通过程中电压下降时间减小,而 V_{th} 也降低,故关断过程中电压上升时间的变化难以给出定性分析。

1.2 平台搭建与测试方法

对半桥模块通过双脉冲实验来测定其在不同温度下的动态参数特性。双脉冲实验原理图如图1所示。半桥模块的上桥臂始终保持负压关断,等效为反并联二极管,下桥臂加双脉冲信号。

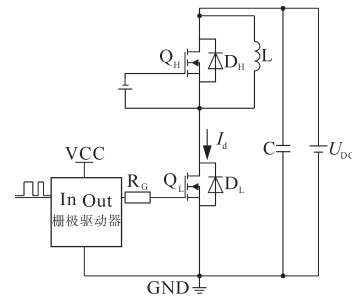


图1 双脉冲实验原理图

Fig.1 Schematic of double pulse test

基于图1中的双脉冲原理图搭建实验测试平台,包括功率回路、驱动回路和测试环节3部分。功率回路半桥模块选型为1 200 V/300 A模块CAS300M12BM2;负载电感为150 μ H空心电感,以防止大电流下引起饱和;直流母线电压为400

V,并联4 700 μF 电解电容提供瞬时电流,紧邻模块并联100 μF 薄膜电容滤波稳压。驱动回路选用Si8285作为隔离芯片,选用ZXGD3006作为栅极驱动器,通过DSP产生双脉冲信号。测试部分示波器型号为MDO3024,带宽200 MHz;电压探头型号为TektronixP5205,带宽100 MHz;电流测量采用罗氏线圈CWT/UM/1/B,带宽30 MHz,量程300 A。双脉冲测试平台实验电路图如图2所示。



图2 双脉冲测试实验电路

Fig.2 Experiment circuit for double pulse test

为尽可能达到接近实际工况下的测试效果,将功率模块、驱动板、负载电感、母线电容均置于温箱内部;DSP以及示波器等置于温箱外。测试条件为:母线电压400 V,考虑模块通流能力和罗氏线圈量程,负载电流为50~150 A,整个实验平台环境温度为-20~60 $^{\circ}\text{C}$ 。

实验过程保持母线电压为400 V不变,调整双脉冲第1个脉冲的宽度来控制负载电流,实验中电流取值分别为50 A,100 A,150 A,对应脉宽分别为18 μs ,36 μs ,54 μs 。第二脉宽设为4 μs ,两脉宽之间间隔为4 μs ,以保证开通关断过程电流基本不变。

2 实验结果与分析

在-20 $^{\circ}\text{C}$,0 $^{\circ}\text{C}$,20 $^{\circ}\text{C}$,40 $^{\circ}\text{C}$,60 $^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下依次进行50~150 A 3个电流等级的双脉冲测试。给出测试波形,并对其中的开关时间、开关损耗以及电流电压过冲、电应力等主要的暂态参数在不同温度下进行对比分析。

首先,图3、图4以150 A电流等级为例,给出了-20 $^{\circ}\text{C}$,20 $^{\circ}\text{C}$,60 $^{\circ}\text{C}$ 3个温度测试点下所得的开关波形。对图3、图4进行定性分析,得出如下结论:在150 A电流等级下,随着温度的升高,开通过程加快,而关断过程变慢,并且在50 A和100 A电流等级下有相同结论。为给出更具体的定量分析结果,从开关时间、开关损耗,以及电压、电流变化率3个角度给出具体的参数变化。

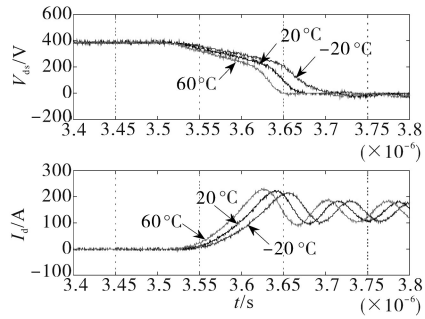


图3 不同温度下开通波形

Fig.3 Turn-on waveforms at different temperatures

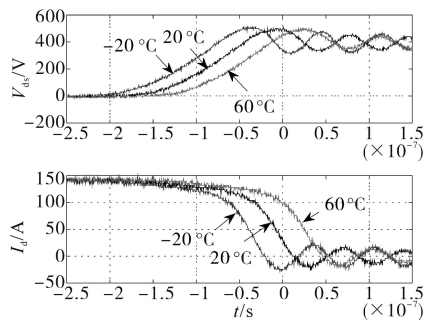


图4 不同温度下关断波形

Fig.4 Turn-off waveforms at different temperatures

2.1 开关时间的温度特性

首先对不同温度下开关过程的时间进行测定,以IEC60747-8中给出的标准测定时间 t_{don} , t_{doff} , t_r , t_f 为例,不同温度下的开关时间测试结果如表1所示。

表1 不同温度下的开关时间

Tab.1 Switching times at different temperatures

温度/ $^{\circ}\text{C}$	t_{don}/ns	$t_{\text{doff}}/\text{ns}$	t_r/ns	t_f/ns
-20	123	456	135	94.0
0	124	477	117	91.0
20	119	490	117	92.4
40	121	482	115	91.2
60	112	523	111	94.4

表1中将延迟时间和上升、下降时间分别测算。随温度升高,开通延迟时间 t_{don} 和上升时间 t_r 呈下降趋势。关断延迟时间 t_{doff} 呈迅速上升趋势,下降时间 t_f 则基本保持不变。这与1.1节中对上升和下降时间给出的理论分析结果相吻合。

为给出更直观的分析结果,将开通、关断总时间 t_{on} , t_{off} 实验结果进行汇总如图5所示,其中, $t_{\text{on}}=t_{\text{don}}+t_r$, $t_{\text{off}}=t_{\text{doff}}+t_f$ 。从图5中可见,随温度升高,关断总时间从550 ns上升到617 ns。开通总时间从258 ns下降到223 ns。从变化绝对值的角度来看,关断时间相对开通时间有更高的温度敏感性,

并且这一敏感性主要体现在关断延迟时间上。

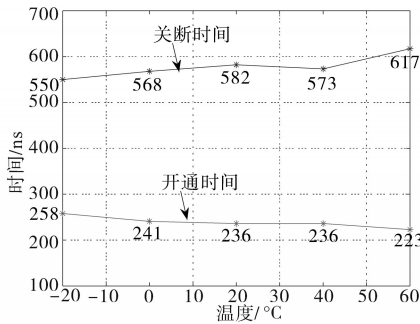


图5 不同温度下开关总时间

Fig.5 Total switching times at different temperatures

2.2 开关损耗的温度特性

开关损耗作为直接影响效率的关键因素,其温度特性具有重要意义。以150 A负载电流为例进行损耗测算,如图6所示。

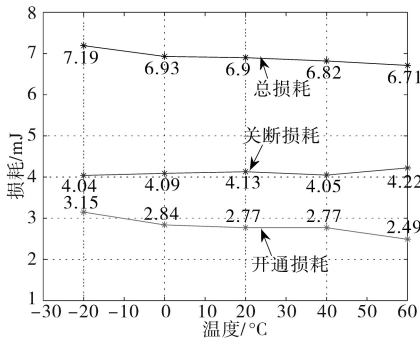


图6 150 A负载电流下开关损耗

Fig.6 Switching losses with the load current of 150 A

由图6可知,在150 A负载电流等级下,温度从-20 °C上升到60 °C,开通损耗从3.15 mJ下降至2.49 mJ,呈明显下降趋势;关断损耗从4.04 mJ上升至4.22 mJ,呈缓慢上升趋势;由于开通损耗的降低幅度更大,总损耗从7.19 mJ下降到6.71 mJ,呈略微下降趋势。

为表现不同电流等级下的温度特性变化,绘制50 A和100 A下的开关损耗如图7、图8所示。表现出的特性类似,温度升高,开通损耗减小、关断损耗增加,但增加幅度较小,总损耗略有减小。随着负载电流的增大,损耗增加,特别的,关断损耗对电流等级的敏感性大于开通损耗。因此50 A下开通损耗较大,150 A下关断损耗较大。

2.3 电应力和电压、电流过冲的温度特性

除去最直观的开关速度和损耗之外,开关过程中的电压变化率 dv/dt 、电流变化率 di/dt 以及其导致的电压、电流尖峰也是影响驱动性能的重要

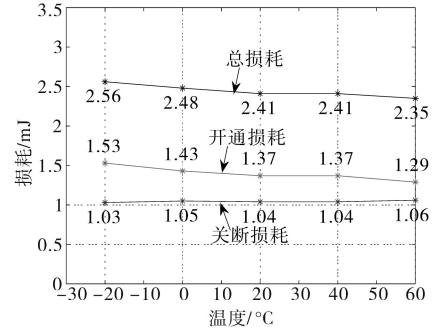


图7 50 A负载电流下开关损耗

Fig.7 Switching losses with the load current of 50 A

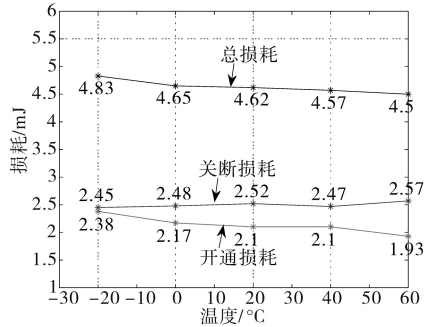


图8 100 A负载电流下开关损耗

Fig.8 Switching losses with the load current of 100 A

参数。考虑到测量精度,以150 A负载下的实验结果为例进行测量,以开关过程中的平均电应力作为测量标准, di/dt 和 dv/dt 数据处理所得结果如图9所示。

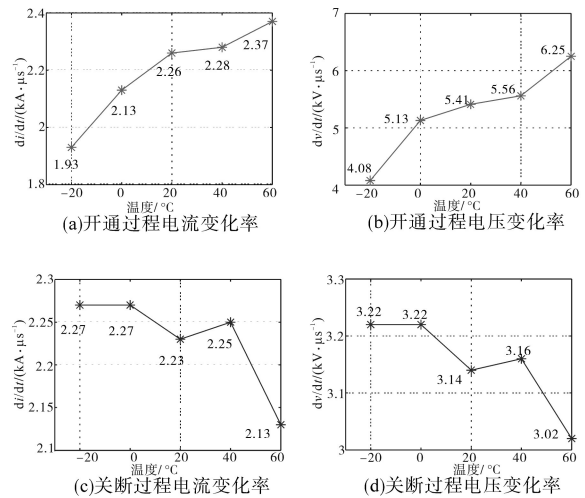


图9 开关过程中的 di/dt 和 dv/dt

Fig.9 di/dt and dv/dt of turn-on and turn-off process

由图9可知,在150 A电流等级下,随着温度从-20 °C上升至60 °C,开通过程中电流变化率从1.93 kA/μs上升至2.37 kA/μs,电压变化率从4.08 kV/μs上升至6.25 kV/μs;关断过程电流变化率从2.27 kA/μs下降至2.13 kA/μs,电压变化率从3.22

kV/ μ s 下降至 3.02 kV/ μ s。随着温度升高,开通过程电应力迅速增大,关断过程电应力有所下降。这与上文中温度升高,开通过程迅速加快,关断过程略有减缓的结论相对应。

在电应力测定的基础上,对 150 A 开通、关断过程电压、电流尖峰在不同温度下进行对比,如表 2 所示。结果以比例形式呈现,基准值为负载电流 150 A,母线电压 400 V。

表 2 150 A 电流负载不同温度下的电压、电流过冲比

Tab.2 Overshoot voltage and current at different temperatures with the load current of 150 A

温度/ $^{\circ}$ C	电压过冲比/%	电流过冲比/%
-20	13	44
0	13	47
20	11	49
40	11	52
60	11	54

从表 2 中可见,温度升高,电压过冲略有减小,电流过冲则呈现明显的增大趋势。通过电应力分析可知,开通过程的电应力随温度升高快速增大,关断过程的电应力随温度升高逐渐减小。对应的,随温度升高,开通过程中的电流过冲呈现明显增大的趋势,而关断过程中的电压过冲则略有减小。由于电流过冲较大,实验负载电流设定值仅增大到 150 A。

3 结论

本文系统研究了 SiC MOSFET 功率模块在 50~150 A 电流、-20~60 $^{\circ}$ C 温度下的暂态温度特性。在理论分析的基础上通过双脉冲实验测定开关波形,对开关过程中的时间、损耗、电应力、及电压、电流过冲等参数进行定量分析,得出大电流下暂态参数的温度特性规律:1)温度升高,开通延迟时间和上升时间呈下降趋势;关断延迟时间呈迅速上升趋势,下降时间基本保持不变。2)温度升高,开通损耗下降,关断损耗略有上升,总体损耗呈略微下降趋势。3)温度升高,开通过程电压、电流变化率迅速增加,关断过程中的电应力略有下降。对应的,电流过冲迅速增大,电压过冲略有减小。

以上是对大电流等级下暂态参数的温度特性分析,对特殊温度下 SiC MOSFET 的应用选型和驱动设计有重要的实际意义和参考价值。例

如,实验结果表明,在高温环境下,关断速度会降低。则可考虑采用负温度系数的门极电阻等方案,加速高温环境下的驱动过程,以保证驱动性能的稳定的温度特性。

另外,驱动板整体置于温箱内,使得实验的温度范围还不够宽泛,后续工作将围绕高温驱动板的设计和更宽范围的温度测试展开。

参考文献

- [1] Elasser A, Chow TP. Silicon carbide benefits and advantages for power electronics circuits and systems [J]. in Proc. of the IEEE, 2002, 90(6): 969-986.
- [2] Millan Jose, Godignon Philippe, Perpina Xavier, *et al.* A survey of wide bandgap power semiconductor devices[J]. IEEE Trans. Power Electron., 2014, 29(5): 2155-2163.
- [3] 徐鹏,柯俊吉,邹琦,等. SiC MOSFET 静态参数温度特性的实验研究[J]. 电力电子技术, 2018, 52(11): 115-117, 124.
- [4] 汪洋,卢志飞,李世强,等. SiC MOSFET 静态温度特性研究[J]. 电力电子技术, 2017, 51(8): 20-23.
- [5] Chen Zheng, Yao Yiyang, Danilovic Milisav, *et al.* Performance evaluation of SiC power MOSFETs for high-temperature applications[C]//2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), Novi Sad, 2012: 1-9.
- [6] Jiang Furong, Sheng Kuang, Guo Qing. Comparative study of temperature-dependent characteristics for SiC MOSFETs [C]// 2016 13th China International Forum on Solid State Lighting: International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China, Beijing, 2016: 50-53.
- [7] Tian Kai, Qi Jinwei, Mao Zhangsong, *et al.* Characterization of 1.2 kV 4H-SiC power MOSFETs and Si IGBTs at cryogenic and high temperatures [C]//2017 14th China International Forum on Solid State Lighting: International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS), Beijing, 2017: 140-143.
- [8] Jiao R, Li G, Chen H, *et al.* Research on the influence of temperature on SiC MOSFET switching characteristics[C]//2019 IEEE Asia Power and Energy Engineering Conference (AP-EEEC), Chengdu, China, 2019: 80-83.
- [9] Qi Jinwei, Yang Xu, Li Xin, *et al.* Temperature dependence of dynamic performance characterization of 1.2 kV SiC power mosfets compared with Si IGBTs for wide temperature applications [J]. in IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9): 9105-9117.
- [10] 徐鹏,柯俊吉,赵志斌,等. 碳化硅 MOSFET 静态特征参数及寄生电容的高温特性研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2018, 45(4): 17-24.

收稿日期:2019-10-08

修改稿日期:2019-11-01