

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.03.009

## SiC MOSFET 短路特性

秦海鸿<sup>1</sup> 徐克峰<sup>1</sup> 王丹<sup>1</sup> 董耀文<sup>1</sup> 赵朝会<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京, 211106; 2. 上海电机学院电气工程学院, 上海, 201306)

**摘要:** 为确保碳化硅(SiC)功率器件在过载、短路等工况下能安全可靠地工作, 必须充分认识 SiC 器件的短路机理。首先对 SiC MOSFET 硬开关短路故障下短路电流原理进行了分析, 在此基础上对不同电路参数对 SiC MOSFET 短路特性的影响进行了对比分析, 揭示了短路特性的关键影响因素, 并对 Si 与 SiC MOSFET 短路能力和器件恶化机理进行了对比分析, 从而为设计 SiC MOSFET 短路保护电路提供一定的指导。

**关键词:** 碳化硅; MOSFET; 短路特性; 短路保护

**中图分类号:** TM315

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1005-2615(2018)03-0348-07

### Short-Circuit Characteristics of SiC MOSFET

QIN Haihong<sup>1</sup>, XU Kefeng<sup>1</sup>, WANG Dan<sup>1</sup>, DONG Yaowen<sup>1</sup>, ZHAO Chaohui<sup>2</sup>

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China;

2. College of Electrical Engineering, Shanghai Dian Ji University, Shanghai, 201306, China)

**Abstract:** To ensure the safety and reliability of silicon carbide (SiC) power devices in the overload, short circuit and other conditions, the short circuit mechanism of SiC devices must be fully understood. Firstly, the mechanism of short-circuit current is analyzed in detail under hard-switching fault. Then, the influence of different circuit parameters on short circuit characteristics of SiC MOSFET is analyzed and compared. The key factors influencing the short-circuit characteristics are further revealed, and the short circuit capacity and device deterioration mechanism of Si and SiC MOSFET are compared and analyzed. The paper provides a guidance for designing short-circuit protection circuit of SiC MOSFET to some extent.

**Key words:** silicon carbide; MOSFET; short-circuit characteristics; short-circuit protection

与硅(Si)功率器件相比,碳化硅(Silicon carbide, SiC)功率器件具有更优电气特性和热特性<sup>[1]</sup>,可大幅提高电力电子变换器的性能,在工业<sup>[2-4]</sup>、高温高频<sup>[5-9]</sup>和可再生能源发电<sup>[10]</sup>等诸多场合中已获得初步应用。随着 SiC 工艺技术的日趋成熟, SiC 功率器件有望取代传统的 Si 功率器件,在未来的电力电子变换器中获得更为广泛的应用与发展。目前, SiC MOSFET 是商业化程度最高的 SiC 可控功率器件。但是,由于 SiC MOS-

FET 管芯面积小, 电流密度大<sup>[11]</sup>且短路能力较弱, 因此对电路保护要求更高, 给 SiC 基电力电子变换器的可靠性带来极大挑战, 特别是在大功率场合, 这一问题更加突出。因此, SiC MOSFET 短路特性及其稳健性逐渐受到研究人员的关注, 成为 SiC MOSFET 重要研究内容之一。

近些年, 国内外诸多学者针对 SiC 功率器件的短路特性进行了研究。文献[12]对 SiC MOSFET 的短路稳健性进行了研究, 得出 400 V 直流母线电

**基金项目:** 国家自然科学基金(51677089)资助项目; 中央高校基本科研业务费专项资金(NS2015039, NS20160047)资助项目; 江苏高校优势学科建设工程资助项目。

**收稿日期:** 2017-03-13; **修订日期:** 2017-09-21

**通信作者:** 秦海鸿, 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, E-mail: qinhaihong@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 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 Haihong, XU Kefeng, WANG Dan, et al. Short-circuit characteristics of SiC MOSFET[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(3): 348-354.

压下 SiC MOSFET 短路承受时间约为  $30 \mu\text{s}$ 。文献[13]在  $600 \text{ V}$  直流母线电压下分别对相同电压定额的两种 SiC MOSFET 的短路稳健性进行了研究,得出两者的短路承受时间分别为  $5 \mu\text{s}$  和  $14 \mu\text{s}$ 。文献[14]对不同直流母线电压下 Si 和 SiC MOSFET 的短路特性进行了对比和研究。但是,这些研究只针对不同直流母线电压的 SiC MOSFET 短路特性进行了研究,忽略了驱动回路参数的影响。另外,这些研究大多只是对实验现象的定性描述,缺乏进一步深入分析。因此,本文首先对 SiC MOSFET 短路机理进行了分析,在此基础上对不同电路参数对其短路特性的影响进行了对比和研究,揭示了短路特性的关键影响因素,并对器件短路能力及恶化机理进行了对比分析,为研究人员设计 SiC MOSFET 短路保护提供了一定的指导。

## 1 短路故障类型及测试电路

功率器件的短路故障类型可分为硬开关故障(Hard switching fault, HSF)和负载故障(Fault under load, FUL)。硬开关故障是指在开关管开通时发生短路故障,即在开关管开通之前,负载已经短路,电源电压直接加在开关管两端。当开关管开通时,就会在电路中形成一个低阻抗回路,导致流过开关管的电流急剧上升。而负载故障是指在开关管完全导通时发生短路故障,即在发生短路故障之前,开关管导通,电路处于正常工作状态。当负载突然短路时,就会在电路中形成一个低阻抗回路,导致回路电流急剧上升。由于硬开关故障下, SiC MOSFET 功率损耗更大,发热更严重,对器件的考验更为严峻,所以本文对 SiC MOSFET 的硬开关故障进行了原理分析。

图1为硬开关故障模式下 SiC MOSFET 短路特性测试原理图。 $U_{\text{DC}}$ 为可调直流电源, $R_{\text{in}}$ 为电源内阻,CB为断路器, $U_{\text{G}}$ 为单脉冲驱动信号, $R_{\text{g}}$ 为驱动电阻, $C_{\text{gs}}$ 、 $C_{\text{gd}}$ 和 $C_{\text{ds}}$ 为 SiC MOSFET 的寄生电容, $L_{\text{g}}$ 、 $L_{\text{d}}$ 和 $L_{\text{s}}$ 分别为包括器件外部引线和器件内部连线的栅极、漏极和源极的寄生电感。

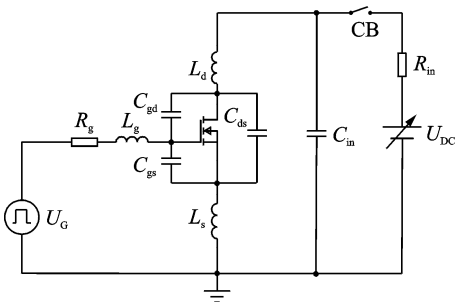


图1 硬开关故障下短路测试原理图

Fig. 1 Schematic of short-circuit test circuit for hard-switching fault

## 2 SiC MOSFET 短路原理分析

硬开关故障下 SiC MOSFET 短路原理波形如图2所示,可以分为4个工作模态。

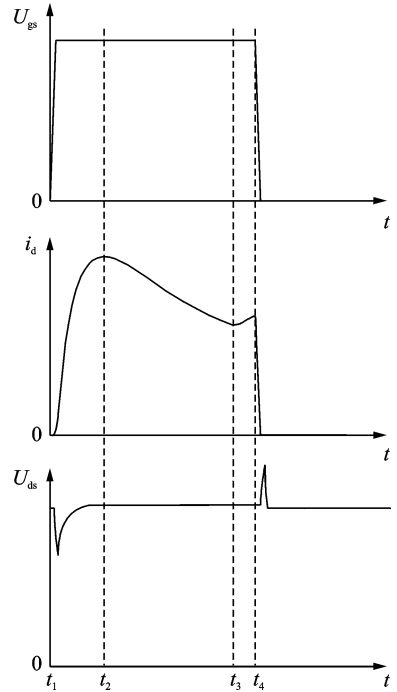


图2 硬开关故障下 SiC MOSFET 短路理论波形

Fig. 2 Short-circuit waveforms of SiC MOSFET for hard-switching fault

模态1 [ $t_1 \sim t_2$ ]:  $t_1$ 时刻之前, SiC MOSFET 处于截止状态。此时,断路器 CB 闭合,直流母线电压  $U_{\text{DC}}$  直接加在 SiC MOSFET 两端。 $t_1$ 时刻, SiC MOSFET 开通。由于功率回路阻抗很小, SiC MOSFET 漏极电流急剧增大。同时,短路电流变化率  $di/dt$  作用于回路寄生电感  $L_{\text{loop}}$  ( $L_{\text{loop}} = L_{\text{d}} + L_{\text{s}}$ ),在  $L_{\text{loop}}$  上产生一个与直流母线电压极性相反的电压  $U_{L_{\text{loop}}}$ ,导致 SiC MOSFET 漏源极电压有所下降。 $U_{L_{\text{loop}}}$  可表示为

$$U_{L_{\text{loop}}} = L_{\text{loop}} \times \frac{di}{dt} \quad (1)$$

则 SiC MOSFET 两端的电压  $U_{\text{ds}}$  为

$$U_{\text{ds}} = U_{\text{DC}} - U_{L_{\text{loop}}} \quad (2)$$

在短路电流上升过程中, SiC MOSFET 的功率损耗导致自发热, SiC MOSFET 结温逐渐升高,导通电阻也随之逐渐增大,导致  $di/dt$  逐渐减小,这是因为在短路回路中 SiC MOSFET 导通之后,导通电阻、寄生电感组成了一个一阶 LR 串联电路,随着导通电阻的增大,回路阻抗增大,电流上升速率有所降低, SiC MOSFET 漏源极  $U_{\text{ds}}$  又逐渐升高。 $t_1 \sim t_2$  阶段内, SiC MOSFET 沟道载流子迁移率具有正温度系数,故短路电流一直增大。但 SiC MOSFET 自身功率损耗很大,导致自发热,开关管

结温快速升高。

模态 2 $[t_2 \sim t_3]$ :随着 SiC MOSFET 结温的升高,  $t_2$  时刻 SiC MOSFET 沟道载流子迁移率开始降低, 导致流过开关管的电流减小,  $di/dt$  为负。

在这一阶段, SiC MOSFET 沟道载流子迁移率具有负温度系数, 可表示为

$$\mu_p(T) = \mu_{p0} \left( \frac{T}{300} \right)^{-2.2} \quad \mu_n(T) = \mu_{n0} \left( \frac{T}{300} \right)^{-2.6} \quad (3)$$

式中:  $\mu_p$  为 4H-SiC 外延层空穴迁移率,  $\mu_n$  为 4H-SiC 外延层电子迁移率,  $\mu_{p0}$  为  $T=300$  K 时空穴迁移率,  $\mu_{n0}$  为  $T=300$  K 时电子迁移率。

模态 3 $[t_3 \sim t_4]$ :随着结温的进一步升高,  $t_3$  时刻, SiC MOSFET 沟道载流子电流减小的速率小于热电离激发漏电流增大的速率, 短路电流又逐渐变大,  $di/dt$  为正。

$t_1 \sim t_4$  的短路能量  $E_C$  可表示为

$$E_C = \int_{t_1}^{t_4} U_{ds} i_d dt \quad (4)$$

式中:  $U_{ds}$  为 MOSFET 漏源极电压,  $i_d$  为漏极电流。

模态 4 $[t_4 \sim ]$ :  $t_4$  时刻开关管关断, 开关管端电压出现关断过压, 电流逐渐减小到零, 此后会出现两种情况: (a) 开关管安全可靠关断; (b) 开关管栅极氧化层击穿, 器件失控。

### 3 电路参数对短路特性的影响

影响 SiC MOSFET 短路特性的因素包括栅极驱动电路参数和直流母线电压。为了量化分析各电路参数对 SiC MOSFET 短路特性的影响, 制作了短路测试平台, 如图 3 所示。待测 SiC MOSFET 采用 ROHM 公司的 SCH2080KE, 其定额为 1 200 V/35 A。测试中直流电源采用 Chroma 公司 62150H-600 型可编程稳压直流电源。功率器件的电压和电流波形通过 Tektronix 公司的高压差分探头 (P5201)、高频电流探头 (TCP303) 和电流探头放大器 (TCPA300) 测得。实验测试条件为: 寄生电感  $L = 0.18 \mu\text{H}$ , SiC MOSFET 驱动电路负向驱动电压设定为  $-2$  V。

#### 3.1 直流母线电压的影响

图 4 给出不同直流母线电压  $U_{DC}$  下, 栅源极电压  $U_{gs}$ , 漏源极电压  $U_{ds}$  和漏极电流  $i_d$  的短路测试波形。直流母线电压升高, 短路电流上升速度更快, 短路峰值电流也逐渐增大, 同时栅源极电压  $U_{gs}$  下降时间变长, 关断过压变化幅度较小。测试中短路脉宽设定为  $5 \mu\text{s}$ , 此时 SiC MOSFET 管芯内部结温并不高, 沟道载流子迁移率具有正温度系数,  $di/dt$  为正, 短路电流一直增大。

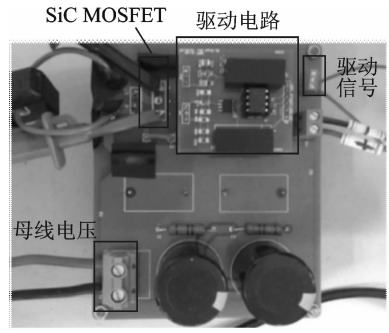


图 3 短路测试电路样机

Fig. 3 Prototype of short-circuit test circuit

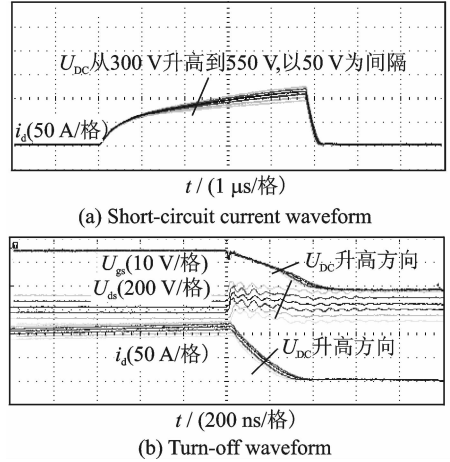


图 4 不同直流母线电压  $U_{DC}$  下的  $U_{gs}$ ,  $U_{ds}$  和  $i_d$  短路测试波形

Fig. 4 Short-circuit waveforms of  $U_{gs}$ ,  $U_{ds}$  and  $i_d$  under different DC bus voltages

#### 3.2 驱动电阻的影响

直流母线电压为 550 V, 驱动电阻  $R_g$  分别取 30, 20, 10 和 5  $\Omega$ 。图 5 给出不同驱动电阻下, 栅源极电压  $U_{gs}$ , 漏源极电压  $U_{ds}$  和漏极电流  $i_d$  的短路测试波形。随着驱动电阻的减小, SiC MOSFET 关断速度更快, 漏源极电压和栅源极电压的振荡略有增大, 而短路电流波形几乎没有变化, 不同驱动电阻下的短路峰值电流保持不变, 这是因为驱动电

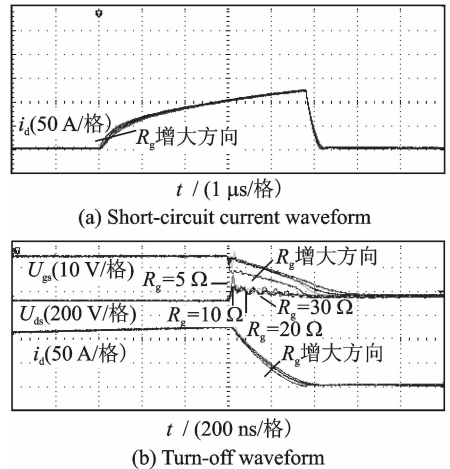


图 5 不同驱动电阻  $R_g$  下的  $U_{gs}$ ,  $U_{ds}$  和  $i_d$  短路测试波形

Fig. 5 Short-circuit waveforms of  $U_{gs}$ ,  $U_{ds}$  and  $i_d$  under different gate resistances

阻主要影响短路电流初期的上升速度,驱动电阻减小会加快短路电流初期的上升速度,但对短路电流波形和短路峰值电流几乎没有影响。

### 3.3 栅极驱动电压的影响

直流母线电压为 550 V,驱动电阻为 30 Ω,由于 SCH2080KE 型 SiC MOSFET 栅极正向电压极限值为 +22 V,考虑一定的安全裕量,驱动电压分别取 +20,+18 和 +15 V。图 6 给出不同栅极驱动电压下,栅源极电压  $U_{gs}$ ,漏源极电压  $U_{ds}$  和漏极电流  $i_d$  的短路测试波形。由图 6 可见,栅极驱动电压对 SiC MOSFET 短路电流影响比较明显。SiC MOSFET 开通瞬间,随着栅极驱动电压的升高,短路电流上升速度越快,短路峰值电流越大。当栅极驱动电压为 +20V 时,短路电流达到峰值后开始逐渐减小,即  $di/dt$  开始为负,这是由于短路峰值增大导致功率管损耗大大增加, SiC MOSFET 内部结温进一步升高使沟道载流子迁移率降低。

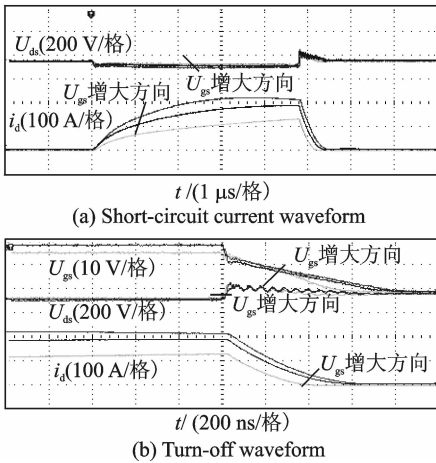


图 6 不同栅极驱动电压下的  $U_{gs}$ ,  $U_{ds}$  和  $i_d$  短路测试波形  
Fig. 6 Short-circuit waveforms of  $U_{gs}$ ,  $U_{ds}$  and  $i_d$  under different gate voltages

### 3.4 电路参数影响的量化分析

为了进一步明确电路参数对短路特性的影响程度,对各电路参数与关断过压、短路峰值电流及短路能量的影响进行了量化分析。

#### (1) 对关断过压的影响

图 7 给出关断过压  $\Delta U_{ds}$  与各电路参数的关系曲线。直流母线电压升高,关断过压变化幅度较小,约为 20 V。驱动电阻越小,关断速度越快,  $di/dt$  在回路寄生电感上产生的电压越高,即关断过压越大,且驱动电阻  $R_g$  为 5 Ω 时,关断过压约是  $R_g$  为 30 Ω 时关断过压的 2 倍。栅极驱动电压越高(低于 20 V),短路电流越大,关断过压越大。由于栅极驱动电压的增大, SiC MOSFET 沟道电阻减小,导致了短路电流峰值的增大。关断过压的增大是由于关断过程中  $di/dt$  的增大,与回路中寄生电感相互作用引起的感应电压增大。当栅极驱动

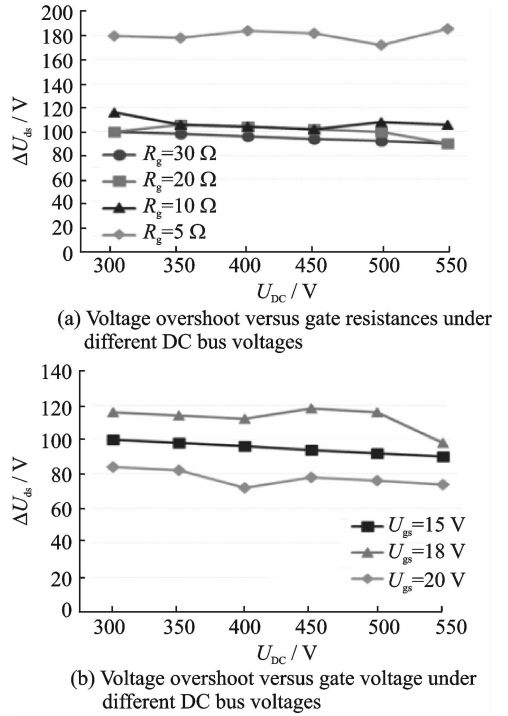


图 7 关断过压  $\Delta U_{ds}$  与各电路参数的关系曲线  
Fig. 7 Relation curves of voltage overshoot versus circuit parameters

电压达到 20 V 时,关断过压减小,这是由于短路损耗增大,器件结温大大升高, SiC MOSFET 沟道载流子迁移率减低,导致短路电流减小。同时,由于此时器件内部结温较高, SiC MOSFET 开启电压降低,关断速度降低,所以过压减小。

#### (2) 对短路峰值电流的影响

图 8 给出短路峰值电流  $i_{d(peak)}$  与各电路参数的

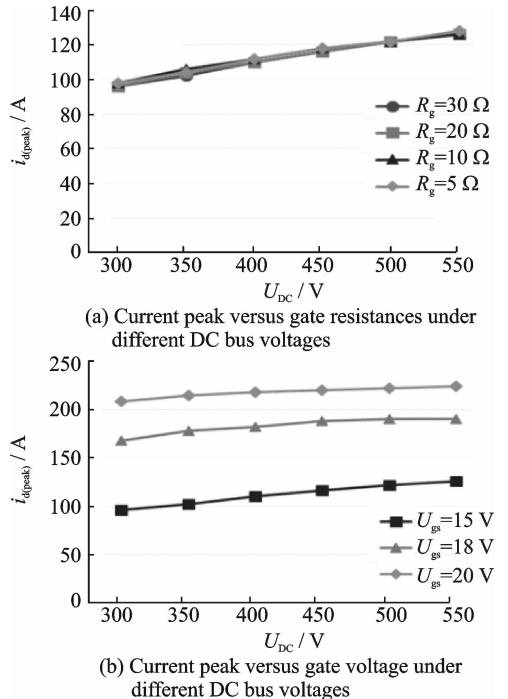


图 8 短路峰值电流  $i_{d(peak)}$  与各电路参数的关系曲线  
Fig. 8 Relation curves of current peak versus circuit parameters

关系曲线。短路峰值电流与直流母线电压正相关,驱动电阻对短路峰值电流几乎没有影响,但栅极驱动电压对短路峰值电流影响较大且电压越高,峰值电流越大,栅极驱动电压  $U_{gs}$  为 20 V 时,短路峰值电流约为  $U_{gs}$  为 15 V 时的 2 倍。此外,当栅极驱动电压较低时(如 15 V),短路峰值电流与直流母线电压近似为线性关系,变化幅度较大。而当栅极驱动电压较高时(如 20 V),随着直流母线电压升高,短路峰值电流增长幅度趋于平缓。

### (3) 对短路能量的影响

图 9 给出了短路能量  $E_c$  与各电路参数的关系图。显然,随着母线电压的升高,短路能量不断增大。而驱动电阻减小,短路能量略有增大。另外,由前述分析可知,栅极驱动电压对关断过压、短路峰值电流有很大的影响,故短路能量对栅极驱动电压较为敏感。栅极驱动电压  $U_{gs}$  为 20 V 时,短路能量是  $U_{gs}$  为 15 V 时的 2 倍左右。

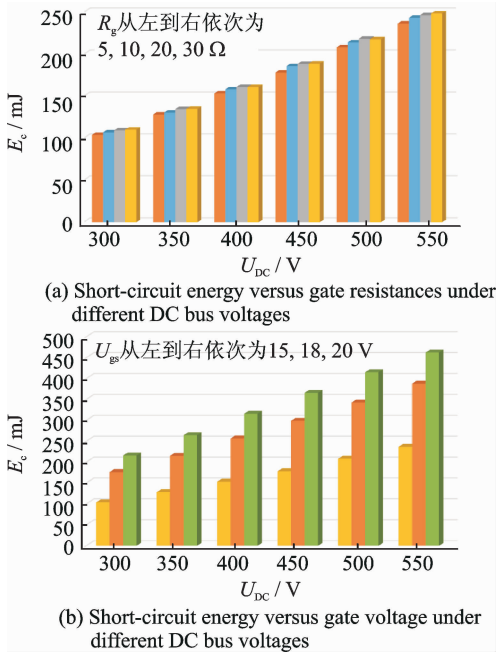


图 9 短路能量损耗与各电路参数关系图

Fig. 9 Relation graphs of short-circuit energy versus circuit parameters

由以上分析比较可知,栅极驱动电阻  $R_g$  对关断过压影响较大,而对短路峰值电流几乎没有影响;直流母线电压对短路峰值电流的影响较大,栅极驱动电压  $U_{gs}$  对关断过压和短路峰值电流的影响均较大。在设计短路保护电路时,往往采用“软关断”技术,即增大关断时的驱动电阻以降低开关管的关断速度,达到降低开关管电压应力的目的,但该方法并不能降低开关管的电流应力。另外,相比于栅极驱动电阻  $R_g$ ,栅极驱动电压  $U_{gs}$  对关断过压和短路峰值电流的影响更为显著,若设计保护电路时采用“多电平关断”,既可以有效降低开关管的

电压应力,又能大大减小开关管的短路电流应力,确保开关管可靠关断,但该方法增大了保护电路设计的复杂性。

## 4 短路能力及器件恶化分析

### 4.1 短路能力

为探究 MOSFET 的短路能力,分别对 1 200 V SiC MOSFET (SCH2080KE) 和 Si MOSFET (IXFH12N120P) 在不同脉宽下的短路特性进行了测试,测试波形如图 10 所示。

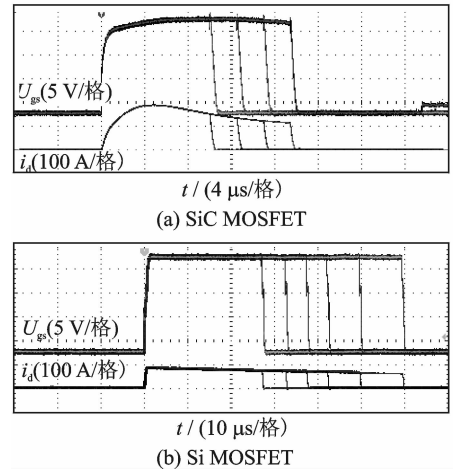


图 10 不同脉宽下 SiC & Si MOSFET 短路特性测试波形  
Fig. 10 Short-circuit waveforms of  $U_{gs}$  and  $i_d$  under different short-circuit pulse width

短路脉宽初始值设置为 10  $\mu$ s,可以看出,短路电流先增大后减小,与前述分析一致。随着短路脉宽的进一步增大,关断时短路电流逐渐减小,但短路能量逐渐增大。当短路脉宽增大至 15  $\mu$ s 时, SiC MOSFET 通态时的栅源极电压  $U_{gs}$  已略有下降,说明此时栅极漏电流增大,器件性能开始恶化;当短路脉宽进一步增大至 17.5  $\mu$ s 时,其通态时的栅源极电压  $U_{gs}$  下降幅度已增大至 2 V,同时在 SiC MOSFET 关断后,经 12  $\mu$ s 延时,栅源极电压  $U_{gs}$  变为 0 V, SiC MOSFET 栅源极已经短路,器件损坏,此时应对的短路能量  $E_c$  为 1.365 J。而与之对应的 Si MOSFET,在短路脉宽为 17.5  $\mu$ s 时,器件依然保持良好的性能,即使脉宽增大至 60  $\mu$ s(短路能量  $E_c$  为 2.403 J) 仍能有效断开短路电流,同时栅源极未被击穿。

### 4.2 器件恶化分析

表 1 给出正常和损坏的 SiC MOSFET 各端子阻抗及体二极管正向压降测试数据。可见,母线电压为 550 V,短路脉宽为 17.5  $\mu$ s 时, SiC MOSFET 栅源极氧化层被击穿,栅源极近似短路,此时 SiC MOSFET 为不可控器件,但是其漏源极阻抗依然很大,具有一定的阻断能力,同时体二极管正向压

降几乎保持不变。

短路时,直流母线电压  $U_{DC}$  直接加在 MOSFET 两端,由于 MOSFET 栅源极电压一般只有十几伏,故直流母线电压由反向偏置的 PN 结(漏源极寄生电容  $C_{ds}$ )和 MOS 电容(栅漏极寄生电容  $C_{gd}$ )共同承担,图 11 给出功率 MOSFET 内部电场强度分布图。

表 1 SiC MOSFET 各端子阻抗及体二极管正向压降测试数据

Tab. 1 Test data of terminal impedance and forward voltage of body diode drop for SiC MOSFET

参数	SCH2080KE	
	完好	损坏
$R_{gs} / R_{sg}$	$\infty / \infty$	0.8/0.8
$R_{gd} / R_{dg}$	$\infty / \infty$	$\infty / \infty$
$R_{ds} / R_{sd}$	$\infty / \infty$	$\infty / \infty$
$U_F / V$	0.677	0.680

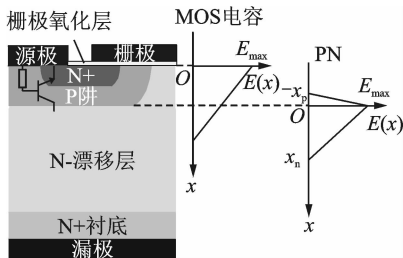


图 11 功率 MOSFET 内部电场强度分布图

Fig. 11 Internal electric field distribution of power MOSFET

由高斯定理可知,栅极氧化层中电场强度与其下方半导体材料电场强度满足

$$E_{\text{oxide}} = \frac{\epsilon_{\text{semi}}}{\epsilon_{\text{oxide}}} E_{\text{max}} \quad (4)$$

式中: $\epsilon_{\text{semi}}$ 为半导体的介电常数, $\epsilon_{\text{oxide}}$ 为氧化层的介电常数。

对于 SiC/SiO<sub>2</sub> (或 Si/SiO<sub>2</sub>),  $\epsilon_{\text{semi}}/\epsilon_{\text{oxide}} \approx 2.5$ ,这意味着氧化层中电场强度是半导体中最大电场强度的 2.5 倍。SiO<sub>2</sub> 的击穿场强为 10 MV/cm,为保证氧化层的长期稳定性,氧化层中电场强度一般应小于 4 MV/cm。对于 Si MOSFET,由于 Si 的临界场强为 0.3 MV/cm,因此氧化层中的电场强度最大为 0.75 MV/cm,远小于 4 MV/cm。但对于 SiC MOSFET,由于 SiC 的临界场强更高,其内部最大电场强度可达 Si MOSFET 的十几倍,使氧化层中电场强度很容易超过 4 MV/cm,不利于氧化层的长期稳定。同时,为获得期望的阈值电压, SiC MOSFET 栅极氧化层厚度设计得更薄,势垒宽度更窄,根据 Fowler-Nordheim 沟道理论,当栅源极施加正向偏置电压时,反型层表面的电子会进入或穿过氧化层,进而产生沟道电流,即栅极漏

电流。短路时,器件内部结温迅速升高使栅极漏电流大大增加。当该漏电流达到一定值就会导致氧化层电介质击穿,产生界面缺陷,最终导致器件恶化。

## 5 结 论

本文对 SiC MOSFET 的短路特性进行了研究,将不同电路参数对短路特性的影响进行了对比分析,并对功率 MOSFET 短路能力及器件恶化机理进行了研究,得出以下结论:(1)栅极驱动电阻  $R_g$  对短路峰值电流和短路能量影响很小,而对关断过压影响较大。(2)直流母线电压对短路峰值电流和短路能量变化影响较大,而关断过压变化影响较小,约为 20 V。(3)栅极驱动电压对 SiC MOSFET 短路特性的影响最为显著。栅极驱动电压  $U_{gs}$  由 15 V 增大至 20 V, SiC MOSFET 短路峰值电流和短路能量约增大了两倍。设计短路保护电路时,为关断 SiC MOSFET 可适当降低栅极电平,这有益于 SiC MOSFET 安全关断,提高电路的可靠性。(4)由于 SiC MOSFET 阈值电压的要求及 SiC 材料的特殊性, SiC MOSFET 的栅极稳定性更差,短路能力更弱。虽然随着工艺的进步, SiC MOSFET 栅极氧化层稳定性有所提高,但快速有效的保护无疑是确保 SiC MOSFET 安全工作的最佳办法。

## 参考文献:

- [1] MILLÁ N J, GODIGNON P, PERPIÁ X, et al. A survey of wide bandgap power semiconductor devices [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(5): 2155-2163.
- [2] ZHANG Zheyu, WANG F, TOLBERT L M, et al. Evaluation of switching performance of SiC devices in PWM inverterfed induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(10): 5701-5711.
- [3] FRIEDRICH S P. SiC power devices for industrial applications [C] // International Power Electronics Conference. Sapporo, Japan: IEEE, 2010: 3241-3248.
- [4] 曹剑坤, 杨彬彬, 刘海春, 等. 集中式飞机外部供电架构及关键参数分析 [J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(1): 114-121.  
CAO Jiankun, YANG Binbin, LIU Haichun, et al. Structure and key parameters of centralized ground power supply for aircraft [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(1): 114-121.

- [5] ALEXANDRU M, BANU V, JORDÁ X, et al. SiC integrated circuit control electronics for high-temperature operation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(5):3182-3191.
- [6] ZHONG Xueqian, WU Xinke, ZHOU Weicheng, et al. An all-SiC high-frequency boost DC-DC converter operating at 320 °C junction temperature[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(10):5091-5096.
- [7] CHEN Zheng, YAO Yiyang, BOROYEVICH D, et al. A 1200-V, 60-A SiC MOSFET multichip phase-leg module for high-temperature, high-frequency applications[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(5):2307-2320.
- [8] NAKAKOHARA Y, OTAKE H, EVANS T M, et al. Three-phase LLC series resonant DC/DC converter using SiC MOSFETs to realize high-voltage and high-frequency operation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(4):2103-2110.
- [9] SAFARI S, CASTELLAZZI A, WHEELER P. Comparative performance evaluation of SiC power devices for high temperature and high frequency matrix converter[C]//*Energy Conversion Congress and Exposition*. Denver, Colorado, USA: IEEE, 2013: 956-962.
- [10] HE Jiangbiao, ZHAO Tiefu, JING Xin, et al. Application of wide bandgap devices in renewable energy systems-Benefits and challenges [C]//*International Conference on Renewable Energy Research and Application*. Hangzhou, China: IEEE, 2014:749-754.
- [11] PREZ-TOMS A, BROSELARD P, GODIGNON P, et al. Field-effect mobility temperature modeling of 4H-SiC metal-oxide-semiconductor transistors[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(11):1-6.
- [12] FAYYAZ A, YANG L, CASTELLAZZI A. Transient robustness testing of silicon carbide (SiC) power MOSFETs[C]//*European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*. Lille, France: IEEE, 2013:1-10.
- [13] OTHMAN LEFEBVRE S, BERKANI M. Investigation of 1.2 kV investigation of SiC MOSFETs for aeronautics applications [C]//*European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*. Lille, France: IEEE, 2013:1-9.
- [14] CASTELLAZZI A, FUNAKI T, KIMOTO T, et al. Short-circuit tests on SiC power MOSFETs[C]//*International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*. Kitakyushu, Japan: IEEE, 2013:1297-1300.

(编辑:陈璐)

