

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.06.015

# 碳化硅 MOSFET 的 Matlab/Simulink 建模及其温度特性评估

周郁明 刘航志 杨婷婷 王兵

(安徽工业大学电气与信息工程学院, 马鞍山, 243002)

**摘要:**为了更好地评估碳化硅(Silicon carbide, SiC)MOSFET 在功率变换装置中的性能,需要建立精确的 SiC MOSFET 模型。针对传统的 SiC MOSFET 的建模方法的不足,在 Matlab/Simulink 环境中提出了一种基于先进迁移率模型的 SiC MOSFET 模型。利用 Matlab/Simulink 强大的数学处理能力和丰富的模块功能,该模型考虑了实际 SiC/SiO<sub>2</sub> 界面特性的影响。利用 SiC MOSFET 的产品手册中的实测曲线和所搭建的实验电路的测试结果验证了所建立模型的准确性。基于所建立的模型,研究了 SiC/SiO<sub>2</sub> 非常重要的界面参数——界面陷阱电荷对 SiC MOSFET 温度特性的影响;从模型和实验上对比了 SiC MOSFET 与 Si MOSFET 在开关电路中瞬态温度的变化,结果显示碳化硅功率器件具有非常优秀的温度特性。

**关键词:**碳化硅 MOSFET; 温度特性; 界面陷阱

中图分类号: TN 386

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2017)06-0851-07

## Matlab/Simulink Modeling and Temperature Characteristics Evaluation of SiC MOSFET

ZHOU Yuming, LIU Hangzhi, YANG Tingting, WANG Bing

(School of Electrical & Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, 243002, China)

**Abstract:** For the purpose of properly assessing the role of SiC MOSFET in the application of power converter, an accurate model of SiC MOSFET is necessary. In this paper, a SiC MOSFET model is proposed based on an advanced mobility model in Matlab/Simulink environment. For the powerful ability of solving equations and plenty of tool box in Matlab/Simulink, more complex physical effects can be incorporated into the model of SiC MOSFET. The accuracy of the model is validated with the production Datasheet and experimental results. Based on the developed model, the effect of SiC/SiO<sub>2</sub> interface traps on the transient temperature of SiC MOSFET is discussed, and the comparison of temperature characteristics between SiC MOSFET and Si counterpart is carried out. Results show that SiC device exhibits very excellent temperature behaviors.

**Key words:** SiC MOSFET; temperature characteristics; interface traps

相较传统的硅(Si)材料而言,碳化硅(SiC)材料具有更宽的禁带,因而基于 SiC 材料的 MOSFET 具有耐压高、温度特性好、抗辐射能力强等优点,

在功率变换、航空航天等领域越来越受到青睐<sup>[1-2]</sup>,因而建立能精确反映 SiC MOSFET 特性的模型显得尤为必要。以前 MOSFET 的建模多数

**基金项目:**国家自然科学基金(51177003,61472228)资助项目;安徽高校自然科学研究(KJ2016A805)资助项目;安徽省自然科学基金(1508085 MF129)资助项目。

**收稿日期:**2016-11-24;**修订日期:**2017-01-10

**通信作者:**周郁明,男,博士,教授,硕士生导师,E-mail:ymzhou@ahut.edu.cn。

**引用格式:**周郁明,刘航志,杨婷婷,等.碳化硅 MOSFET 的 Matlab/Simulink 建模及其温度特性评估[J].南京航空航天大学学报,2017,49(6):851-857. ZHOU Yuming, LIU Hangzhi, YANG Tingting, et al. Matlab/Simulink modeling and temperature characteristics evaluation of SiC MOSFET[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(6): 851-857.

是利用 PSpice 软件来进行<sup>[3-5]</sup>, 由于 PSpice 软件对数学方程处理能力的不足, 建立精确的 MOSFET 模型显得力不从心, 在这方面, 功能强大的 Matlab/Simulink 软件是非常好的选择<sup>[6-7]</sup>。Matlab/Simulink 软件提供了电力系统和电力电子电路仿真的丰富的模块资源, 其 S 函数是一种强大的对模块库进行扩展的新工具。利用该函数, 可以定制自己的 Simulink 模块, 并且利用 Matlab 强大的运算能力, 考虑更为复杂的效应, 建立更为精确的仿真模型。

本文利用 Matlab/Simulink 软件, 在 MOSFET 标准的长沟道器件模型的基础上, 通过修改模型中的迁移率, 引入 SiC/SiO<sub>2</sub> 的界面特性参数, 考虑了界面电荷对 SiC MOSFET 温度特性的影响, 并利用 SiC MOSFET 的产品手册中的实测曲线和实验电路的测试结果验证了所建立模型的准确性。所建立的 SiC MOSFET 模型, 能应用在 Matlab/Simulink 的电力电子电路的仿真中, 精确反映 SiC MOSFET 对功率变换器以及电力电子系统性能的影响。

## 1 建模方法

一般的 MOSFET 的建模, 都是基于标准的长沟道器件模型, 这种模型结构简单, 求解方程方便, 能较好地满足精度和仿真时间的要求。该模型用下列 3 个电流表达式来描述 MOSFET 在不同电压作用下的器件行为。

$$I_{DS} = 0 \quad V_{GS} \leq V_{TH} \quad (1)$$

$$I_{DS} = \mu C_{ox} \frac{W}{L} [(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - \frac{1}{2}V_{DS}^2] \cdot (1 + \lambda V_{DS})$$

$$V_{GS} > V_{TH} \& V_{DS} < V_{GS} - V_{TH} \quad (2)$$

$$I_{DS} = \mu \frac{C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \cdot (1 + \lambda V_{DS})$$

$$V_{GS} > V_{TH} \& V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH} \quad (3)$$

上述表达式依次描述 MOSFET 的截止区、线性区、饱和区, 其中  $\mu$  为载流子迁移率,  $W$  为器件沟道宽度,  $L$  为沟道长度,  $V_{TH}$  为阈值电压,  $\lambda$  为沟道长度调制参数。

标准的长沟道器件模型是基于 Si 材料而开发的, 对于 Si MOSFET 而言, 是无需考虑其 Si/SiO<sub>2</sub> 界面特性对其特性的影响; 而 SiC/SiO<sub>2</sub> 界面由于存在密度很高的界面陷阱, 该陷阱能够捕获 MOSFET 沟道中的载流子, 形成陷阱电荷, 并成为电荷散射中心, 阻碍沟道载流子的运动, 降低了沟道载流子的迁移率, 增加了器件的导通电阻和功率损耗, 严重退化 SiC MOSFET 的性能, 大量的研究

人员在努力降低 SiC/SiO<sub>2</sub> 界面陷阱密度, 以此提高 SiC MOSFET 的性能<sup>[8]</sup>。

描述 MOS 器件沟道载流子的迁移率是 Mathiessen 法则, 该法则将反型层迁移率  $\mu_{inv}$  定义为如下形式<sup>[9]</sup>

$$\frac{1}{\mu_{inv}} = \left( \frac{1}{\mu_B} + \frac{1}{\mu_{AC}} + \frac{1}{\mu_{SR}} + \frac{1}{\mu_C} \right) \quad (4)$$

上述反型层迁移率  $\mu_{inv}$  来自 4 个迁移率分量, 分别是体晶格散射 ( $\mu_B$ )、声子散射 ( $\mu_{AC}$ )、表面粗糙度散射 ( $\mu_{SR}$ )、库伦散射 ( $\mu_C$ ) (见表 1)。

表 1 4 种迁移率分量表达式及其所对应的参数

Tab. 1 Four mobility components and their parameter values

迁移率分量	表达式	取值
$\mu_B$	$\mu_{min} + \frac{\mu_{max} - \mu_{min}}{1 + \frac{N_A}{N_{REF}}}$	$\mu_{max} = 950 \text{ cm}^2/\text{V s}$
		$\mu_{min} = 40 \text{ cm}^2/\text{V s}$
		$N_A = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
		$N_{REF} = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
$\mu_{AC}$	$\frac{B}{E_{\perp}} + \frac{CN_A^{\alpha_1}}{TE_{\perp}^{1/3}}$	$B = 1.0 \times 10^6 \text{ cm/s}$
		$\alpha_1 = 0.0284$
		$C = 3.23 \times 10^6 \text{ K cm/s (V/cm)}^{-2/3}$
$\mu_{SR}$	$\frac{D_1}{E_{\perp}^2}$	$D_1 = 5.82 \times 10^{14} \text{ cm}^2/\text{V s (V/cm)}^2$
$\mu_C$	$NT^{\alpha} \frac{Q_{inv}^{\beta}}{Q_{trap}}$	$\alpha = 1 \quad \beta = 1$
		$N = 0.007525 \text{ cm}^2/\text{V s}$

表 1 列出了 4 种迁移率分量的表达式及其中一些参数的经验值<sup>[9]</sup>。其中, 在库伦迁移率  $\mu_C$  的表达式中,  $T$  代表器件温度,  $Q_{inv}$  为反型层电荷,  $Q_{trap}$  为陷阱电荷。当越多的载流子被陷阱捕获时,  $Q_{trap}$  的值就越高,  $Q_{inv}$  就越低,  $\mu_C$  更会降低。当 SiC MOSFET 工作在低电场区域时, 其反型层迁移率  $\mu_{inv}$  主要由  $\mu_C$  决定。如果用  $\mu_{inv}$  替换 MOSFET 标准的长沟道模型中的常数迁移率, 就可以定量讨论陷阱电荷  $Q_{trap}$  对 SiC MOSFET 特性的影响。

反型层电荷  $Q_{inv}$  可以用 MOS 系统的电荷叠层模型 (Charge-sheet model) 求得, 其为总空间电荷  $Q_{sc}$  和耗尽层电荷  $Q_{dep}$  的差值

$$Q_{inv} = Q_{sc} - Q_{dep} \quad (5)$$

$\mu_{AC}$  和  $\mu_{SR}$  中的  $E_{\perp}$  为反型层有效电场, 也可以由电荷叠层模型求得 (其中,  $\epsilon_s$  为 SiC 的介电常数)

$$E_{\perp} = \frac{1}{\epsilon_s} \left( \frac{1}{2} Q_{inv} + Q_{dep} \right) \quad (6)$$

式 (5) 中的  $Q_{sc}$  和  $Q_{dep}$  详细的计算过程见文献

[9~11]。该计算过程非常繁琐,还涉及到半导体物理中表面势的隐函数的求解,这对于 PSpice 这类电路仿真软件而言是无能为力的,而对于数学运算能力强、工具箱丰富的 Matlab/Simulink 而言,这些方程的求解很容易完成。

在 Matlab/Simulink 中实现上述计算过程的基础上,创建了 SiC MOSFET 模型的子系统外观,如图 1 所示。该模型有六个引脚,分别是栅极 Gate,漏极 Drain,源极 Source,器件温度  $T$ ,漏源电压  $V_{DS}$ ,栅源电压  $V_{GS}$ 。图 2 是该模型内部组成结构,由实现不同功能的多个子模块构成。其中,栅极电阻  $R_G$ 、漏极电阻  $R_D$ 、源极电阻  $R_S$ 、栅源电容  $C_{GS}$ 、体二极管 Body Diode 等均是 Simulink 模块库中的基本模块。

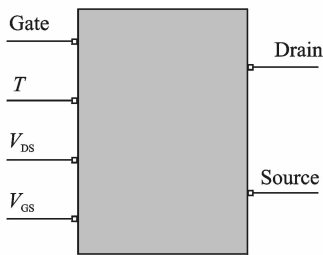


图 1 SiC MOSFET 的 Matlab/Simulink 模型外观  
Fig. 1 Block of SiC MOSFET in matlab/simulink

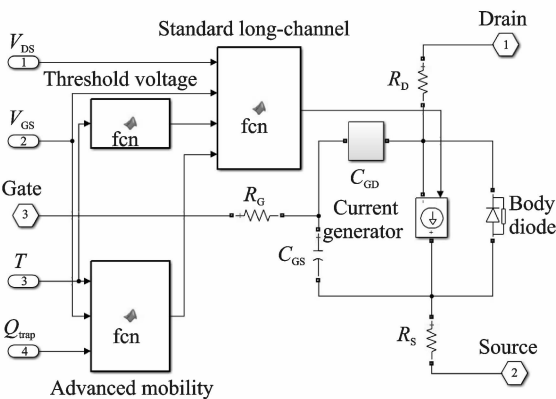


图 2 SiC MOSFET 的 Matlab/Simulink 模型组成结构  
Fig. 2 Content inside Matlab/Simulink block for SiC MOSFET

图 2 中 Threshold voltage 模块是实现 MOSFET 阈值电压依赖于温度函数,用  $V_{TH} = 4.66 - 0.015(T - 27)$  表示;Advanced mobility 模块是实现 MOSFET 沟道反型层迁移率的计算,即完成等式(4~6)的计算;Standard long-channel 模块实现等式(1~3)的计算。最后各个模块的计算结果输入到 Current generator 模块,实现 MOSFET 电流的输出。该模型是温度  $T$  和界面陷阱  $Q_{trap}$  的函数,并且一些模型参数也是温度  $T$  的函数,因此,该模型可以较为准确地反映 MOSFET 在工作时

瞬态温度的变化。

## 2 模型的验证

本文以美国 Cree 公司商业化的、型号为 C2M0080120D(1200 V/36 A)的 SiC MOSFET 为参照对象,建立 SiC MOSFET 的模型,并用该 MOS 管的产品手册中的实测数据验证模型的静态特性,用该 MOS 管搭建 Boost 变换器实验电路验证模型的动态特性。

图 3 示出了在 25 °C 和 150 °C 下模型和 C2M0080120D 手册数据的转移特性的对比,显示两者的吻合度比较好。验证动态特性的 Boost 电路结构及电路参数如图 4(a)所示,实验平台如图 4(b)所示。其中,Matlab/Simulink 的电路参数与实验电路参数,除了前者的电感  $L$  高出 0.01 mH 之外(这是考虑实际电路存在的寄生电感),其他电路参数都是一致的。通过小心调整迁移率模型中的界面陷阱电荷参数,在  $Q_{trap}$  取  $2.57 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ,仿真电路和实验电路的开通和关断时漏源电压  $V_{DS}$  波形对比如图 5 所示,从图中可以看出两者取得了较好的吻合。

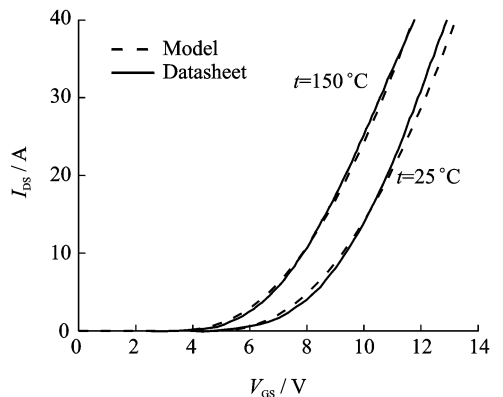


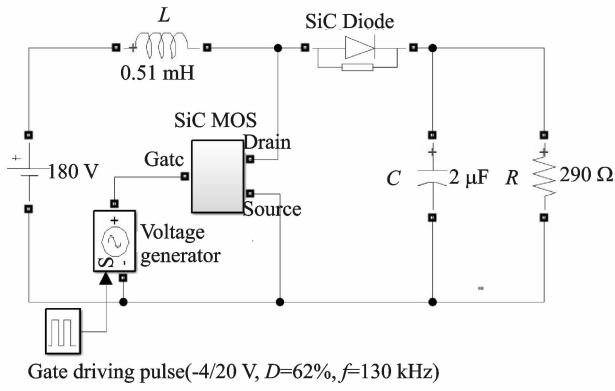
图 3 转移特性曲线的对比  
Fig. 3 Comparison of transfer characteristics between Matlab/Simulink model and C2M0080120D Datasheet

## 3 模型的应用

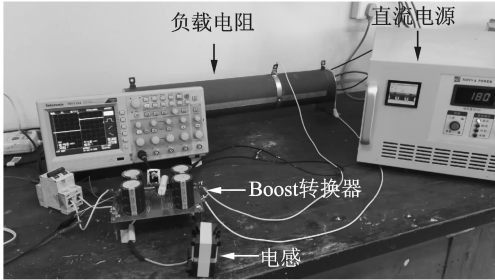
### 3.1 界面陷阱电荷对 SiC MOSFET 温度特性的影响

SiC/SiO<sub>2</sub> 界面陷阱捕获 MOS 器件反型层沟道的载流子,并形成库伦散射,增加了器件的导通电阻,并增加了器件的损耗,引起器件工作温度的升高。利用本文建立的 Matlab/Simulink 模型,可以定量讨论界面陷阱电荷  $Q_{trap}$  对 SiC MOSFET 工作时瞬态温度的影响。

目前比较成功、商业化的减小 SiO<sub>2</sub>/SiC 界面



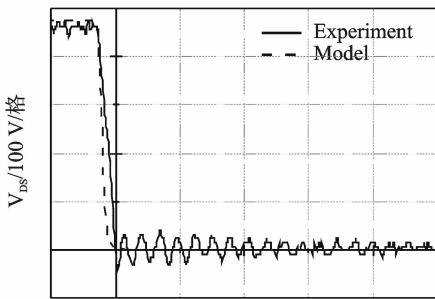
(a) Matlab/Simulink



(b) Experimental platform

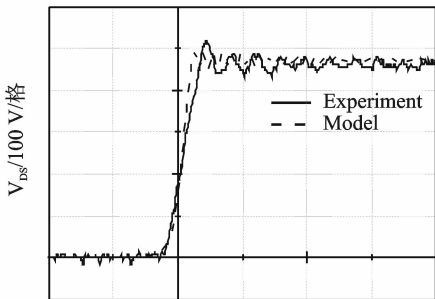
图4 Boost 变换器的 Matlab/Simulink 仿真电路和实验平台

Fig. 4 Schematic of Boost converter in Matlab/Simulink and the experimental platform



t / 50 ns/格

(a) Turn-on



t / 50 ns/格

(b) Turn-off

图5 Boost 电路 Matlab/Simulink 仿真与实验的开通及关断过程  $V_{DS}$  波形对比

Fig. 5 Comparison in simulated and measured turn-on and turn-off waveforms of  $V_{DS}$  in Boost converter

陷阱密度的工艺是高温氮的钝化,为了研究不同界面陷阱密度对 SiC MOSFET 温度的影响,本文根据实验测得的高温氮退火后的  $SiO_2/SiC$  界面陷阱密度在能级中的分布情况,选取了 3 条界面陷阱密度的分布曲线<sup>[12]</sup>,如图 6 所示。这 3 条曲线是在 1 175 °C 的一氧化氮(NO)环境下分别经过不同的退火时间测得的,分别定义为 Trap 0, Trap 1, Trap 2。界面陷阱电荷由如下公式计算<sup>[9]</sup>

$$Q_{\text{trap}} = \int_{E_i}^{E_c} D_{it}(E) dE \quad (7)$$

式中:  $E_i$  为表面本征费米能级。3 种界面陷阱电荷分别定义为  $Q_{\text{trap}0}$ ,  $Q_{\text{trap}1}$ ,  $Q_{\text{trap}2}$ , 经式(8)计算的数值分别为  $7.00 \times 10^{10}$ ,  $1.40 \times 10^{11}$  和  $2.57 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 。

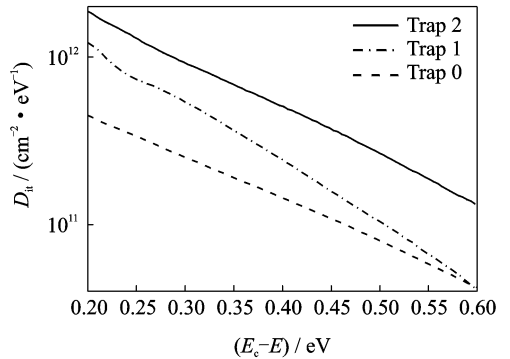


图6 3 种不同的界面陷阱密度分布曲线

Fig. 6 Three different distributions of interface trap

在钳位电感开关电路中讨论不同界面陷阱电荷对 SiC MOSFET 温度特性的影响。其中, MOSFET 的栅极驱动电压的频率为 50 kHz, 占空比为 80%, 栅极驱动电阻为 10 Ω。一般地, 功率器件在工作时温度的升高主要来自于器件自身的损耗, 包括开关损耗和导通损耗, 并且工作频率越高, 温度越高。模拟功率器件的损耗与温度的关系一般采用电-热网络模型, 而图 7 所示的 Foster 模型是模拟这种关系的一种较为常用的结构<sup>[13]</sup>, 这种 RC 网络模型模拟器件内部的结到器件外壳的热传导过程, 因此, 当器件工作在开关状态时, 由热路模型计算得到的结温参数可实时反馈给电气模型。本文建立的 SiC MOSFET 模型是以 C2M0080120D 为参照对象, 根据该器件手册瞬态

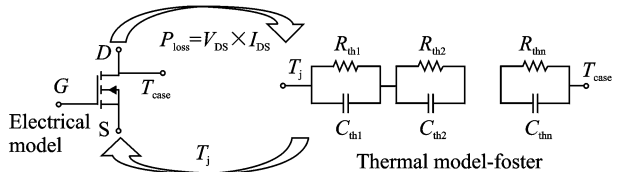


图7 MOSFET 的 Foster 电-热耦合模型

Fig. 7 Electro-thermal model of MOSFET

热阻抗拟合到的 Foster 模型的 RC 网络参数如表 2 所示,拟合曲线的对比如图 8 所示。同时,表 2 和图 8 也示出了后文中用到的 Si MOSFET(型号为 IXFK32N100P)的 RC 参数和拟合曲线的对比。另外,图 7 中的  $P_{loss}$  为器件的功率损耗,  $T_{case}$  为器件外壳的温度,而器件的结温  $T_j$ ,则由式(8)描述

$$T_j = T_{case} + P_{loss} Z_{th} \quad (8)$$

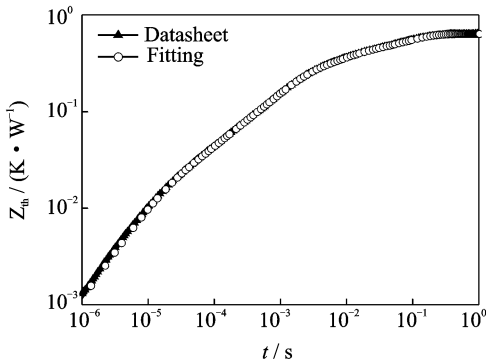
式中:  $Z_{th}$  即为瞬态热阻抗,由图 7 中的 RC 网络参数决定

$$Z_{TH} = \sum_{i=1}^n R_i \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{R_i C_i}\right) \right] \quad (9)$$

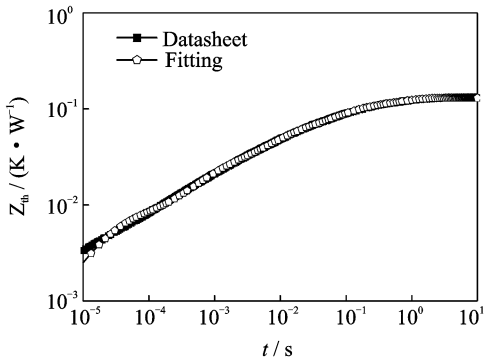
表 2 Foster 网络模型的 RC 参数

Tab. 2 RC parameters of Foster network

热阻 $R_{th}/(K \cdot W^{-1})$		热容 $C_{th}/(J \cdot K^{-1})$	
SiC MOSFET	Si MOSFET	SiC MOSFET	Si MOSFET
$R_{th1}=0.02622$	$R_{th1}=0.03049$	$C_{th1}=0.0045499619$	$C_{th1}=0.2735651$
$R_{th2}=0.1671$	$R_{th2}=0.03283$	$C_{th2}=0.050185518$	$C_{th2}=18.982638$
$R_{th3}=0.1812$	$R_{th3}=0.04556$	$C_{th3}=0.0076600442$	$C_{th3}=1.6534241$
$R_{th4}=0.01403$	$R_{th4}=0.01496$	$C_{th4}=0.0012238061$	$C_{th4}=0.04803476$
$R_{th5}=0.2513$	$R_{th5}=0.006268$	$C_{th5}=0.36573816$	$C_{th5}=0.00354659$



(a) SiC power MOSFET



(b) Si power MOSFET

图 8 SiC MOSFET 和 Si MOSFET 瞬态热阻抗曲线的拟合

Fig. 8 Fitted curves of the transient thermal impedance for SiC power MOSFET and Si power MOSFET

图 9 示出了图 6 中三种界面陷阱电荷所对应的 SiC MOSFET 瞬态温度的变化曲线。由图可见,随着界面陷阱电荷  $Q_{trap}$  的增加, SiC MOSFET 的结温也增加。这是来源于界面陷阱对 MOS 器件沟道载流子的作用,较高密度的界面陷阱电荷,意味着较少的沟道载流子、较高的通态电阻,并且延迟了器件的开通、提前了器件的关断<sup>[14]</sup>,导致器

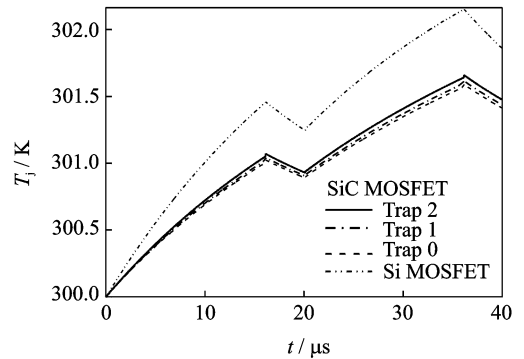


图 9 3 种不同界面陷阱所对应的 SiC MOSFET 的动态结温波形

Fig. 9 Transient temperature profiles of SiC MOSFET with different distributions of interface trap

件的开关损耗和导通损耗都在增加,结果使器件的温度上升的更多。表 3 列出的不同界面陷阱密度 SiC MOSFET 的损耗也说明了此点结论。

表 3 3 种不同界面陷阱密度所对应的 SiC MOSFET 的功率损耗

Tab. 3 Loss of SiC power MOSFET corresponding to three different interface traps

界面陷阱密度	通态损耗/W	总损耗/W
Trap 0	71.880	74.224
Trap 1	73.662	75.176
Trap 2	75.210	76.768

### 3.2 SiC MOSFET 与 Si MOSFET 温度特性对比

利用所建立的 SiC MOSFET 的 Matlab/Simulink 模型,对比了 SiC MOSFET 和 Si MOSFET 的温度特性,其中, Si MOSFET 的 Matlab/Simulink 模型也是式(1~3)所描述的标准长沟道器件模型,只不过迁移率采用式(10)来描述

$$\mu = 1\,340 \times \left(\frac{T}{300}\right)^{-1.5} \quad (10)$$

式中  $T$  同样为器件的温度。

Si MOSFET 也采用图 7 所示的电-热耦合模型。图 9 中同时也示出了 Si MOSFET 在前述同样的钳位电感开关电路中器件瞬态温度的仿真曲线。由图可见,在栅极驱动信号两个周期内的每个时间点, Si MOSFET 的温度都比 SiC MOSFET 的温度高,而且 Si MOSFET 的温度上升率也比 SiC MOSFET 的要高。通过仿真计算的 Si MOSFET 的通态损耗为 324.173 W,而其总损耗高达 361.202 W,远远高于表 3 所示的 SiC MOSFET 的功耗。

为了验证 SiC MOSFET 比 Si MOSFET 具有更好的温度特性,搭建了双路 Boost 变换器,如图 10 所示。变换器的开关管分别是前文提到的型号为 C2M0080120D(1200 V/36 A)的 SiC MOSFET 和型号为 IXFK32N100P(1000 V/32 A)的 Si MOSFET,双路 Boost 变换器是在同一块 PCB 上实现的,两个 MOS 器件都没有外加散热片并且是自然冷却。图 11 对比了两种 MOSFET 在开关频率  $f$  同为 40,160 kHz,以及 SiC MOSFET 开关频率  $f_1$  为 160 kHz、Si MOSFET 的开关频率为  $f_2$  为 40 kHz 时的热成像图。

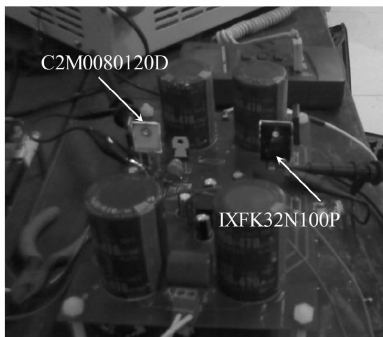
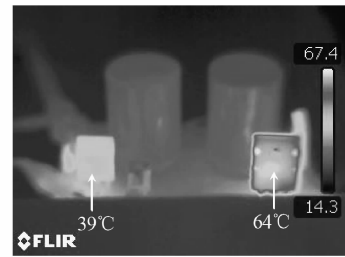


图 10 双路 Boost 电路实验平台

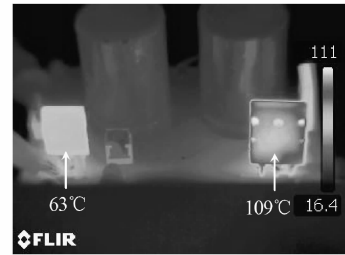
Fig. 10 Experimental platform of double-Boost converter

由图 11 可以看出,在开关频率  $f$  为 40 kHz 时, SiC MOSFET 的温度只有 39 °C,而 Si MOSFET 的温度为 64 °C;开关频率  $f$  升高到 160 kHz 时, SiC MOSFET 的温度升高到 63 °C, Si MOSFET 的温度高达 109 °C; SiC MOSFET 的开关频率为 160 kHz,其温度为 65 °C, Si MOSFET 的开关频率为 40 kHz 时,其温度为 61 °C,这时两者的温度基本上接近。

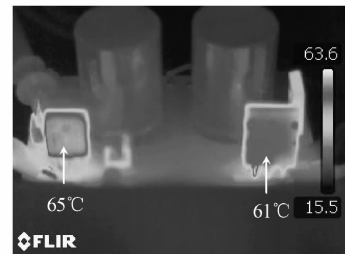
较好的温度表现意味着较低的功耗,可以用较小体积的散热装置,并且能胜任更高的工作频率、环境更为恶劣的现场,这对保障功率变换装置的稳



(a) Switch frequency  $f=40$  kHz



(b) Switch frequency  $f=160$  kHz



(c) Switch frequency  $f_1=160$  kHz for SiC MOSFET,  $f_2=40$  kHz for Si MOSFET

图 11 SiC MOSFET 和 Si MOSFET 在不同工作频率下的热成像图

Fig. 11 Thermal images of SiC MOSFET and Si counterpart at different operating frequencies

定运行、提高装置的功率密度、减小装置的体积有着积极的意义。

## 4 结 论

SiC MOSFET 是目前技术发展比较快速的功率半导体器件,在功率变换、航空航天等领域越来越受到欢迎。利用 Matlab/Simulink 强大的数学处理能力和丰富的模块功能,在 Matlab/Simulink 环境中建立了 SiC MOSFET 模型,利用产品手册的数据和实验测试结果验证了模型的准确性,并和 Si MOSFET 对比了温度特性,取得了如下结论。

(1) 相较传统的 SiC MOSFET 建模而言, Matlab/Simulink 建模可以考虑更复杂的物理效应,建立更为精确的器件模型,研究更多的器件参数或者工艺参数对功率器件的影响,是建立功率半导体器件电路仿真模型的新思路。

(2) SiC/SiO<sub>2</sub> 的界面陷阱严重地影响了 SiC MOSFET 的特性,随着界面陷阱密度的增加,器件

的功率损耗增加,器件温升也随之增加,这为 SiC MOSFET 的制备提供了思路。

### 参考文献:

- [1] 王莉,朱萍. 新型宽带 SiC 功率器件在电力电子中的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(4): 524-532.  
WANG Li, ZHU Ping. Overview of application of SiC power devices in power electronics[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(4): 524-532.
- [2] TRENTIN A, ZANCHETTA P, WHEELER P, et al. Performance evaluation of high-voltage 1.2 kV silicon carbide metal oxide semi-conductor field effect transistors for three-phase buck-type PWM rectifiers in aircraft applications[J]. IET Power Electronics, 2012, 5(9): 1873-1881.
- [3] WANG J, ZHAO T F, LI J, et al. Characterization, modeling, and application of 10-kV SiC MOSFET [J]. IEEE Transactions on Electronic Device, 2008, 55(8): 1798-1806.
- [4] SUN K, WU H, LU J, et al. Improved modeling of medium voltage SiC MOSFET within wide temperature range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(5): 2229-2237.
- [5] DANIEL J, MUHAMMAD N. Analytical PSpice model for SiC MOSFET based high power modules [J]. Microelectronics Journal, 2016(53): 167-176.
- [6] 程国勇,郭稳厚. 基于多自由度飞机模型的机场道面平整度评价方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(4): 606-614.  
CHENG Guoyong, GUO Wenhong. Airport pavement roughness evaluation based on three-degree-of-freedom aircraft model[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(4): 606-614.
- [7] 陈强,孙建红,张书晔,等. 机载多支路液体冷却系统仿真研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(3): 389-395.  
CHEN Qiang, SUN Jianhong, ZHANG Shuyue, et al. Simulation on airborne multi-branch liquid cooling system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(3): 389-395.
- [8] ROZEN J, AHYI A C, ZHU X, et al. Scaling between channel mobility and interface state density in SiC MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Electronic Device, 2011, 58(11): 3808-3811.
- [9] PÉREZ-TOMÁS A, BROSELARD P, GODIGNON P. Field-effect mobility temperature modeling of 4H-SiC metal-oxide-semiconductor transistors[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(11): 114508-6.
- [10] ARNOLD E, ALOK D. Effect of interface states on electron transport in 4H-SiC inversion layers [J]. IEEE Transactions on Electronic Device, 2001, 48(92): 1870-1877.
- [11] ARNOLD E. Charge-sheet model for silicon carbide inversion layers[J]. IEEE Transactions on Electronic Device, 1999, 46(3): 497-503.
- [12] ROZEN J, DHAR S, ZVANUT M E, et al. Density of interface states, electron traps, and hole traps as a function of the nitrogen density in SiO<sub>2</sub> on SiC[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(12): 124506-124511.
- [13] 朱萍,王莉,阮立刚. 一种考虑温度影响的 SiC JFET 的数据驱动模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(1): 151-159.  
ZHU Ping, WANG Li, RUAN Ligang. Data driven model for SiC JFET with thermal effects[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(1): 151-159.
- [14] TANIMOTO Y, SAITO A, MATSUURA K, et al. Power-loss prediction of high-voltage SiC MOSFET circuits with compact model including carrier-trap influences[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(6): 4509-4516.

