

基于 SiC MOSFET 模型的开关特性研究



李文杰, 王田虎*, 赵阳, 王保强, 缪千年, 沈运哲, 汪蓉, 储洪成

江苏理工学院电气信息工程学院, 江苏常州 213001

摘要: 随着电力电子技术的不断发展, 以 SiC、GaN 为代表的第三代半导体材料, 因其在禁带宽度、击穿电场、热导率、电子饱和速率等关键参数方面具有显著优势, 满足了现代工业对高功率、高电压、高频率的需求。SiC MOSFET 在发挥其高频优势时, 随着开关频率的提高, 在器件开通与关断过程中产生较大的电压变化率和电流变化率, 并且在回路杂散参数影响下, 电流电压尖峰振荡问题逐渐加重, 严重时将会影响变换装置效率及开关频率的提升。论文主要研究分析 SiC MOSFET 器件特性, 在厂商提供模型基础上修改模型, 通过搭建静态和动态测试电路, 观察模型静态特性曲线, 并对比原模型与优化后模型在开关过程的漏极电压与电流波形。从结果中得出, 优化后模型在开关时间上做了提升, 并在开关振荡波形有很大改善; 通过双脉冲电路验证优化后模型的准确性, 并设置不同温度、驱动电阻条件下, 研究观察漏源极电压与漏极电流开通关断情况, 研究结果将为实际应用中 SiC MOSFET 的开关特性改善提供数据支持。

关键词: 碳化硅 MOSFET; 电路仿真; 开关特性; LTspice

DOI: [10.57237/j.se.2023.01.004](https://doi.org/10.57237/j.se.2023.01.004)

Research on the Switching Characteristics Based on the SiC MOSFET Model

Li Wenjie, Wang Tianhu*, Zhao Yang, Wang Baoqiang, Miu Qiannian, Shen Yunzhe, Wang Rong, Chu Hongcheng

School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China

Abstract: With the continuous development of power electronics technology, the third-generation semiconductor materials represented by SiC and GaN have significant advantages in the band gap width, breakdown electric field, thermal conductivity, electron saturation rate and other key parameters, which meet the needs of modern industry for high power, high voltage and high frequency. When the SiC MOSFET plays its high frequency advantage, with the increase of switching frequency, the voltage change rate and current change rate of the device will be larger in the process of turning on and off. This paper mainly analyzes the characteristics of SiC MOSFET devices, and modifies the model based on the model provided by the manufacturer. By establishing static and dynamic test circuits, the static characteristic curves of the model were observed, and the drain voltage and current waveforms of the original model and the optimized model were compared during the switching process. The results show that the switching time of the optimized model is improved, and the oscillation waveform is greatly

基金项目: 江苏省研究生实践创新计划项目《新能源汽车充电桩 SiC MOSFET 仿真及实验研究》(SJCX22_1479).

*通信作者: 王田虎, tianhu2003@126.com

收稿日期: 2022-11-27; 接受日期: 2023-01-16; 在线出版日期: 2023-02-03

<http://www.sciandeng.com>

improved. Then, the accuracy of the optimized model is verified by the double-pulse circuit, and the drain source voltage and the drain source current are studied and observed under different temperature and drive resistance conditions. This paper provides data support for improving the switching characteristics of SiC MOSFET in practical applications.

Keywords: SiC MOSFET; Circuit Simulation; Switching Characteristic; LTspice

1 引言

随着半导体照明、5G 通信技术、太阳能、智能电网、新能源并网等领域的火热，不间断电源、新能源汽车 DC-DC 变换器、充电桩、快充、无线充等新兴应用电力电子器件扮演十分重要的角色的，这也对功率器件的性能提出了新的挑战[1-3]。Si 基器件受到其材料的限制，难以满足要求。因此，以 SiC、GaN 为代表的第三代半导体材料脱颖而出，可用于替代传统的 Si 材料[4-5]。SiC 作为第三代宽禁带半导体的代表材料，以其优秀的材料特性是最有希望替代 Si 材料而制作电子器件的，成为未来电力电子器件的主要发展方向[6-8]。

表 1 半导体材料特性对比

材质	Si	GaAs	GaN	SiC
禁带结构	间接带隙	直接带隙	间接带隙	直接带隙
禁带宽度 (eV)	1.1	1.4	3.4	3.3
电子迁移率 (cm^2/Vs)	1350	8500	2000	1000
介电常数	11.9	13.1	9	10.1
击穿场强 (kV/cm)	0.3	0.4	3.3	2.8
电子饱和漂移速率 (10^7cm/s)	1	1	2.7	2.2
热导率 ($\text{W/cm}\cdot\text{K}$)	1.5	0.5	1.3	4.9
器件理论最高工作温度	175	350	800	600

SiC 因其高击穿场强度、宽带隙、高电子饱和漂移速率和高工作温度等优越的特性[9, 10]，成为了众多学者研究关注的焦点。文献[11-13]提出一种基于 PSpice 仿真软件的 SiC MOSFET 变温度参数模型，并对关键参数的设置进行优化改进。文献[14]针对 SiC MOSFET 器件出现的电压电流尖峰过大、振荡问题、串扰问题进行分析与研究，提出一种改进驱动电路方法的辅助支路。文献[15, 16]使用非分段、连续可导的方程对模型进行了定义，并且考虑环境温度对模型的影响，建立了适用于不同环境温度的 SiC MOSFET 非分段模型。文献[17]针对 SiC MOSFET 器件特性，对 Spice 中典型 MOSFET 等效电路模型进行了改进，增加了温控电压源和电流源用于补偿 SiC MOSFET 的温控静态特性；在门漏极加入了非线性电容用于描述 SiC MOSFET 的动态特性。文献

[18]通过对 SiC MOSFET 开关电路深入分析后，得到其开关过程各阶段的电压电流方程，通过数学方程时域求解，建立一阶数学模型，并在此基础上对器件寄生电容和跨导的非线性表达建立更为精确的高阶数学模型。本文将基于 SiC MOSFET 模型，对模型进行优化修改，并封装至 LTspice 仿真软件中，分析其静态特性。通过双脉冲电路对比原模型与优化后模型的开关过程漏源极电压与电流变化，并设置不同温度、不同驱动电阻，观察漏源极电压与漏极电流开通关断情况。

2 SiC MOSFET 特性

2.1 SiC MOSFET 模型

为在工程应用前能够得到更准确的仿真结果，在厂家提供程序基础上对其模型做出补充与修改。该模型有 5 个端口，Gate、Drain 和 Source 分别对应着 SiC MOSFET 的栅极、漏极和源极， T_j 与 T_c 分别对应着 SiC MOSFET 的结温和壳温，可模拟 SiC MOSFET 的基本特性，准确模拟 SiC MOSFET 在各实际电路中的动作情况。在仿真时，只需在端口 T_j 与 T_c 处连接相应的电压源，即可模拟其对应的温度条件。如图 1 所示为 SiC MOSFET 模型：

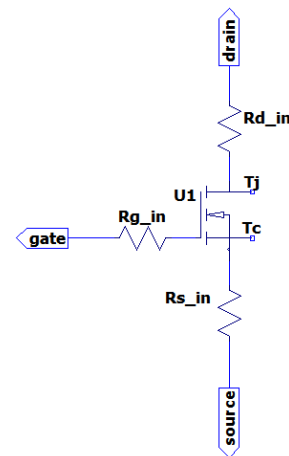


图 1 SiC MOSFET 模型

2.2 静态特性分析

SiC MOSFET 静态特性主要是指静态转移特性和静态输出特性，实际上为 SiC MOSFET 的电流 I_D 与栅源电压 V_{GS} 和漏源电压 V_{DS} 的关系。将模型封装至 LTspice 仿真软件中,如图 2 所示为基于 C2M0080120D 模型搭建静态特性仿真电路, 分别对栅源极电压 V_{GS} 和漏源极电压 V_{DS} 进行直流扫描分析, 仿真得到转移特性曲线和输出特性曲线, 如图 3-图 6 所示。

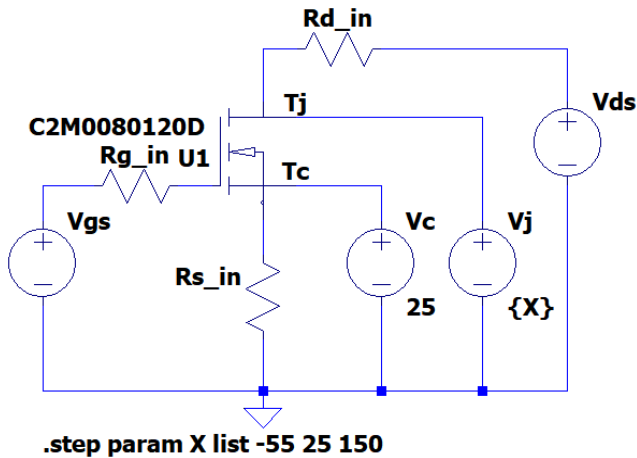


图 2 静态特性仿真电路

通过对转移特性曲线图分析发现, 随着结点温度的提升, 特性曲线左移, 这是因为 Spice 模型阈值电压在随着温度不断升高时, 呈不断下降趋势, 即在电压较小时, MOSFET 也将是导通状态。

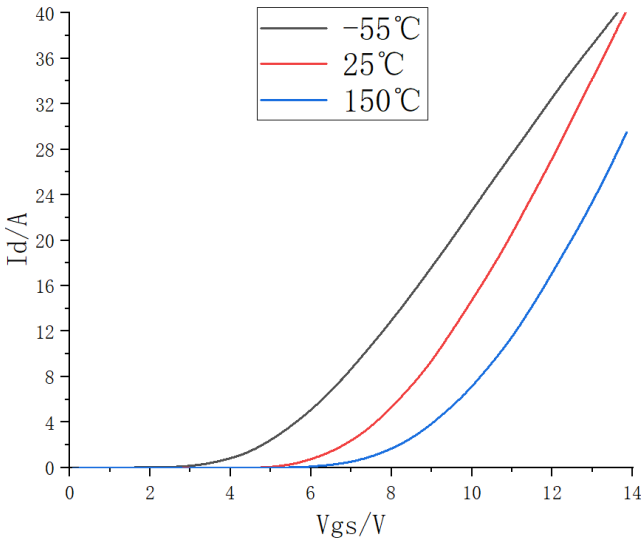


图 3 $T_j=-55\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 与 $150\text{ }^\circ\text{C}$ Spice 模型静态转移特性曲线

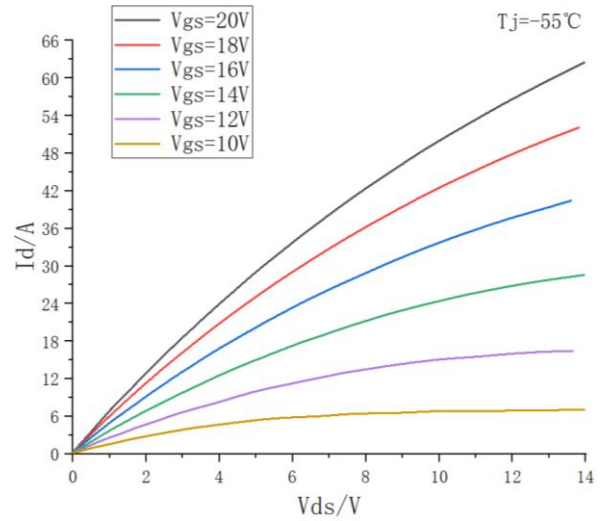


图 4 $T_j=-55\text{ }^\circ\text{C}$ Spice 模型静态输出特性曲线

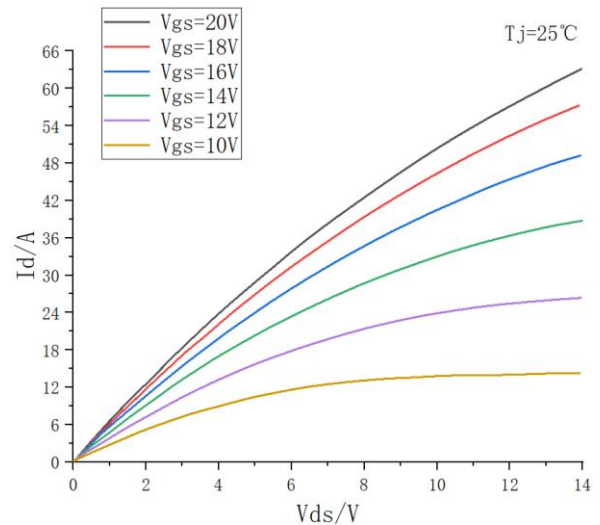


图 5 $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ Spice 模型静态输出特性曲线

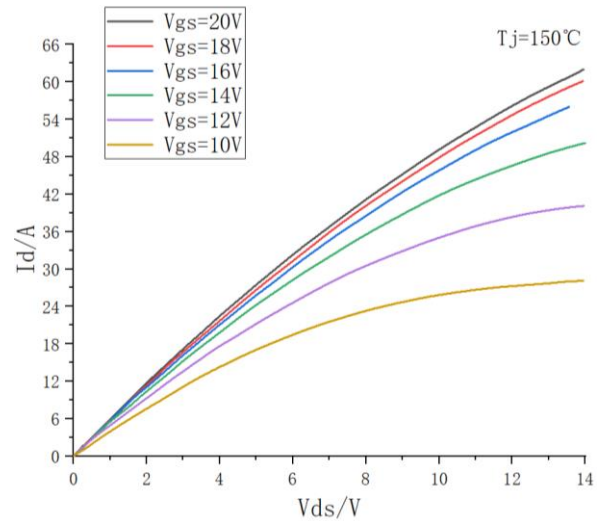


图 6 $T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$ Spice 模型静态输出特性曲线

3 动态特性分析

3.1 开关过程

SiC MOSFET 的动态特性可通过测量其开关过程中关键参数来分析, 由于数据手册中并未提供相关资

料, 因此通过搭建如图 7 双脉冲测试电路来分析厂商提供模型与修改后的模型的动态特性。通过对比两组不同模型的开关特性, 验证修改后模型的准确性与提升性, 并为以后基于 SiC MOSFET 开关特性设计驱动电路提供了数据支持。

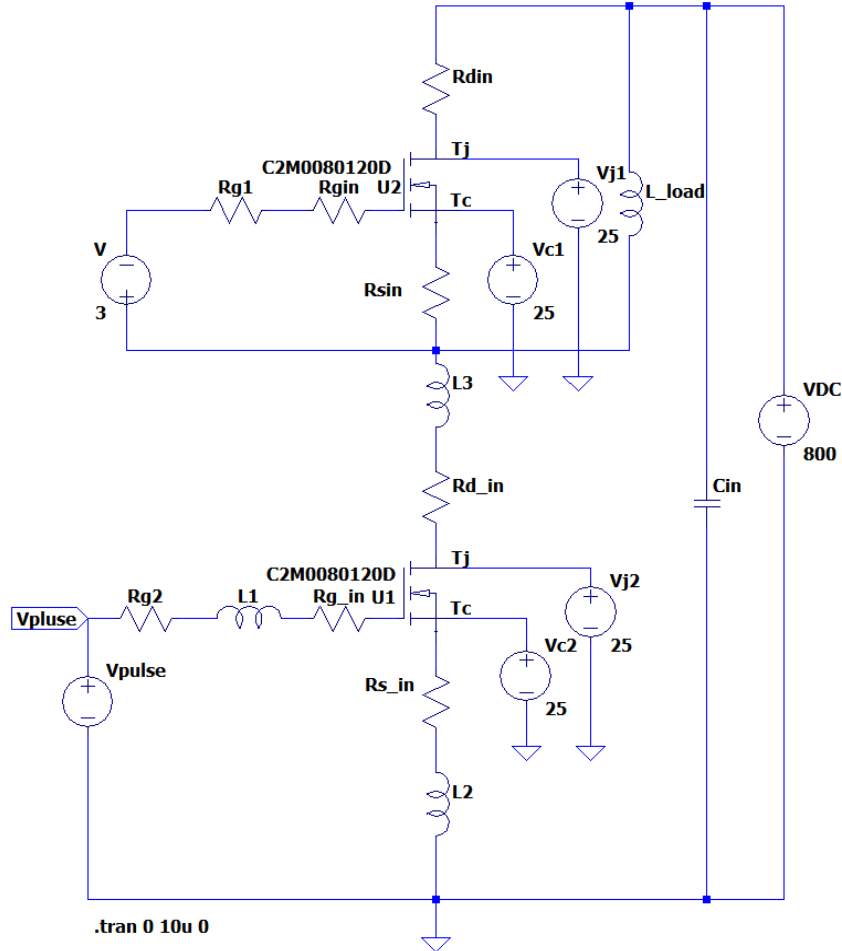


图 7 动态特性仿真电路

双脉冲电路指的是用两个不同的脉冲去控制电路中 MOS 管的开和关, 在管子的开关过程中测量其动态参数。通过仿真图看出, 上下各有一个 SiC MOSFET 器件 U1 和 U2, 其中 U1 管作为测试管, 并将双脉冲电压加在 U1 的栅源极上, 由 U1 来控制电路的开关。由

于电感电流不能突变, 所以在 U1 测试管关闭时, 电感电流会继续流经上管 U2。因此上管 U2 相当于一个续流二极管, 起到续流作用。因此在仿真过程中, 施加负向电压在上管 U2 栅源极两端, 使 U1 测试管工作时其处于关断状态。

表 2 双脉冲电路仿真相关参数

参数	输入电压 VDC (V)	负载电流 (A)	负载电感 L (μH)	驱动电阻 (Ω)
数值	800	36.92	130	5

在 25℃ 条件下, 得到的仿真波形如图 8-9 所示

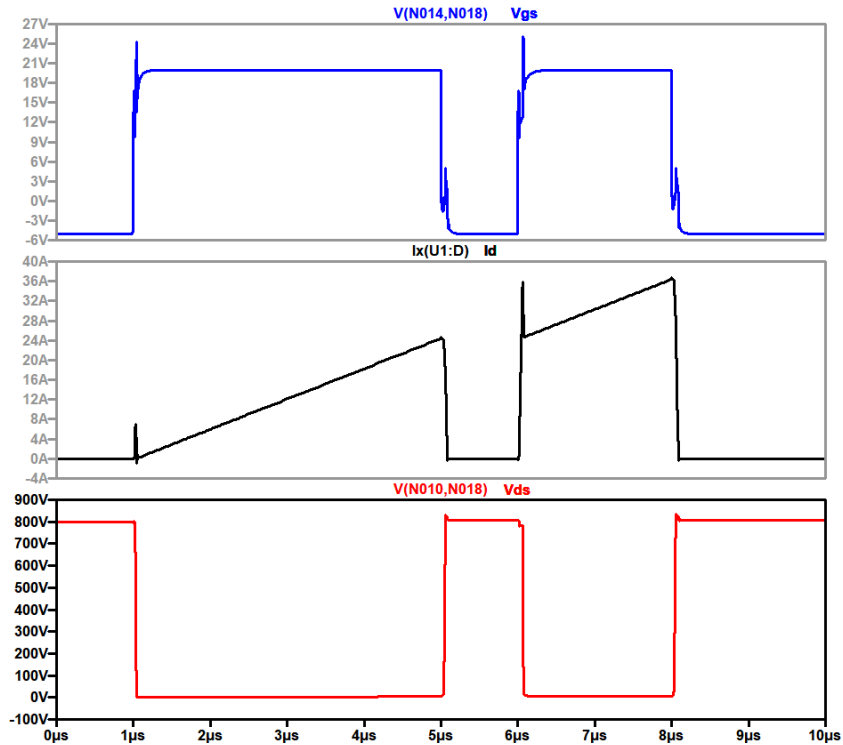


图 8 25 °C 情况下修改后模型开关仿真波形

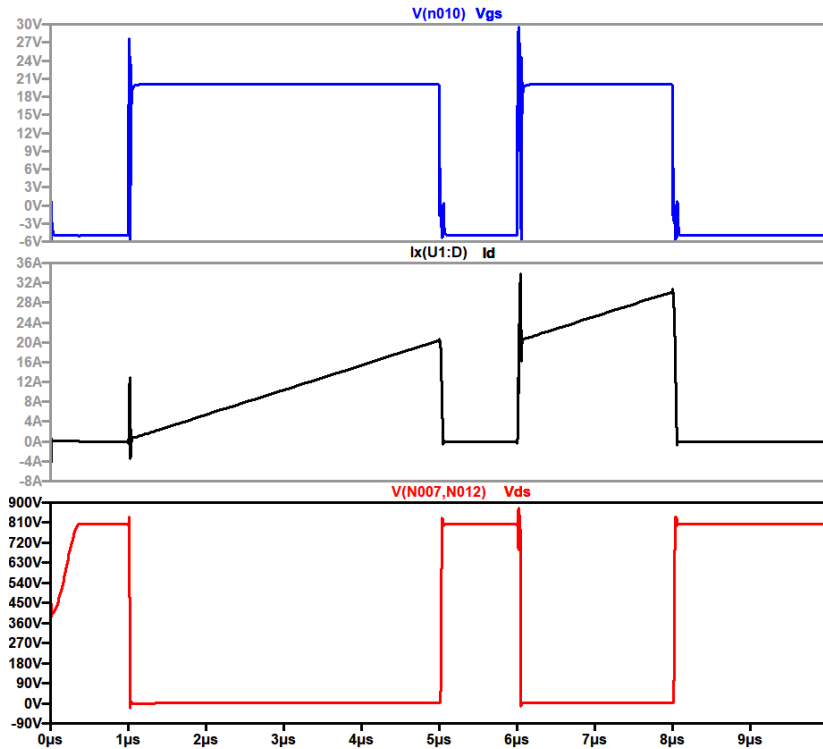


图 9 25 °C 情况下原模型开关仿真波形

为了验证修改后模型是否在开关过程中关键特性得到优化，分别对比原模型与修改后模型的 U1 管第一次关断和第二次开通瞬间仿真波形，如图 10-11 所示。

根据对比发现，原模型在第二次开通瞬间开通电压和开通电流有较大的振荡情况，而修改后模型开关仿真波形则相对比较平稳，驱动电压无论是原模型还是修

改后模型在开通关断瞬间均出现振荡情况，这需要通过设计驱动回路来优化改善。

为了更直观地验证模型的准确性，通过分析模型开关仿真波形，对比原模型与修改后模型的开关过程电压

上升时间与下降时间，发现修改后模型开关电压上升下降时间均有提升。且原模型在开通瞬间振荡较为明显，而修改后模型的开关振荡并不明显，这均好于原模型，因此也进一步验证修改后模型的准确性与优化提升。

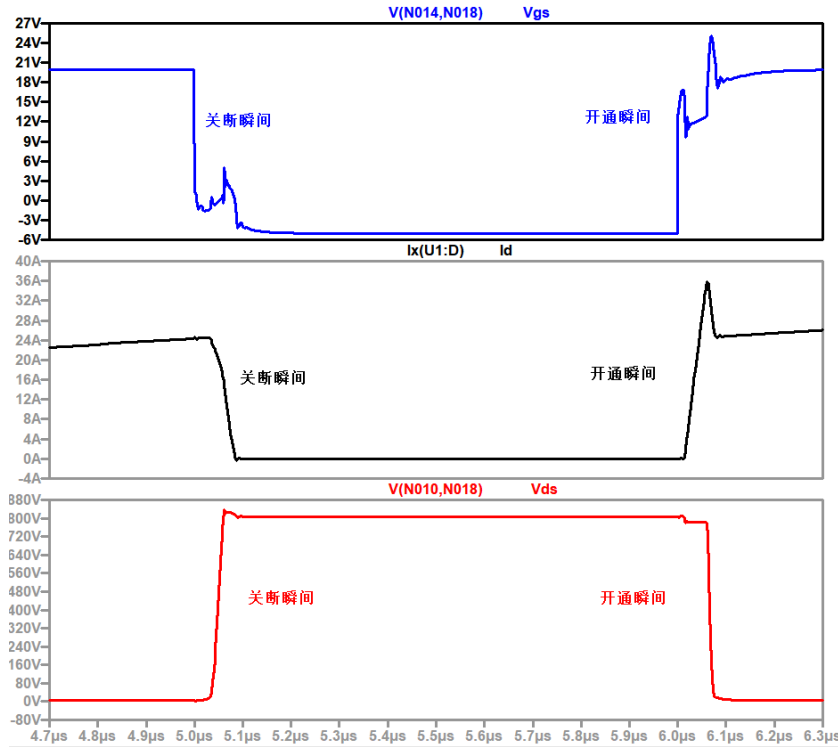


图 10 修改后模型第一次关断、第二次开通瞬间

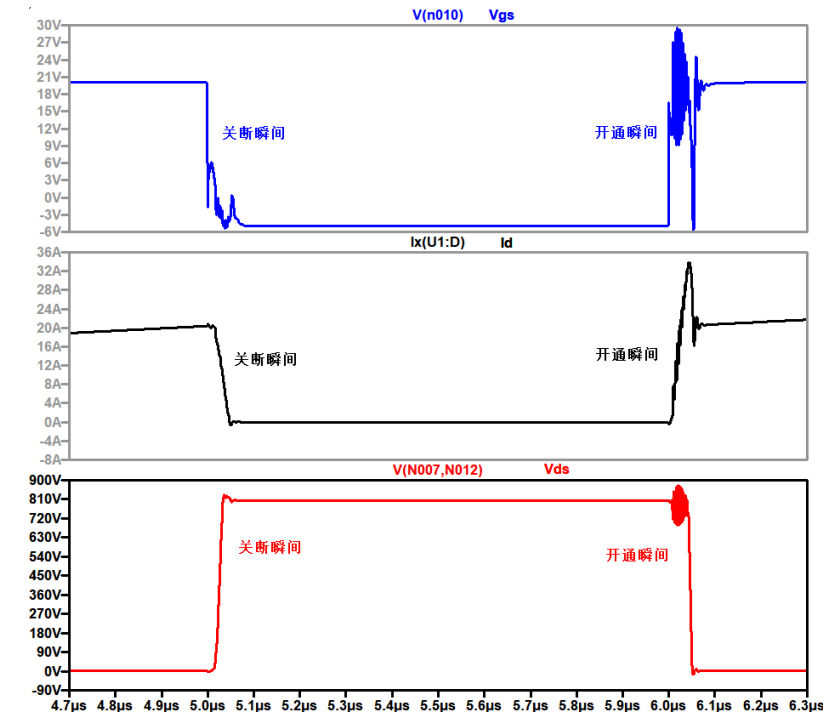


图 11 原模型第一次关断、第二次开通瞬间

由数据表中定义电压上升时间 t_r 代表从 10% V_{ds} 第一次上升到 90% V_{ds} 所用的时间，电压下降时间 t_f 代表从 90% V_{ds} 第一次下降到 10% V_{ds} 所用的时间。电压上升时间与下降时间对比如表 3 所示。

表 3 电压上升时间与下降时间的对比

参数	电压上升时间 t_r	电压下降时间 t_f
原模型 (ns)	22	14
修改后模型 (ns)	19	13

3.2 不同温度情况下的开关情况

通过分析得知，SiC MOSFET 的跨导随温度升高而增大，而米勒电压与跨导呈负相关。因此，在温度发生变化时，器件开通和关断时间将会发生改变。为了进一步验证模型的准确性，将模型封装至 LTspice 仿真软件，搭建双脉冲测试电路，通过在不同的环境温度情况下，观察模型的开关波形电压和电流开通和关断情况。

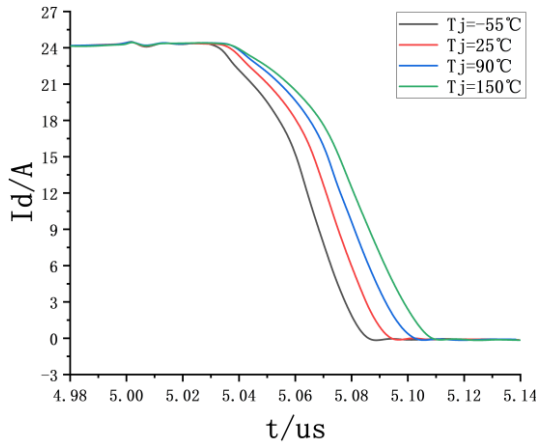


图 12 不同温度下关断电流波形

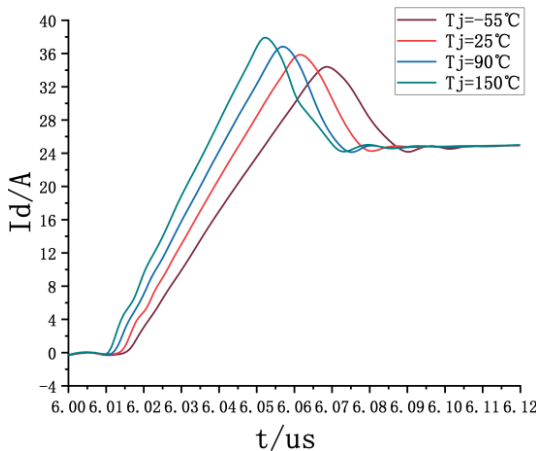


图 13 不同温度下开通电流波形

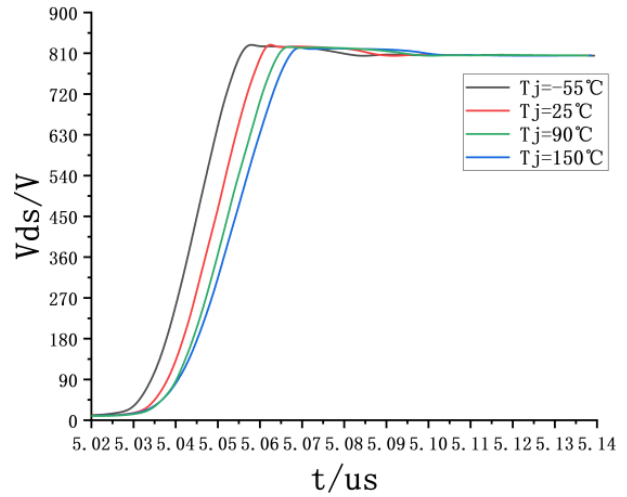


图 14 不同温度下关断漏极电压波形

从关断电压电流波形图看出，随着温度的升高，曲线右移，关断响应时间延时，开始时刻变大。而从开通过程，随着温度的升高，曲线左移，开通响应加快，电压下降时间变小。通过对比原模型在不同温度下的开关波形，也同样是如此随温度变化而变化，开关过程的 dv/dt 随着温度升高分别出现增大和减小的趋势。

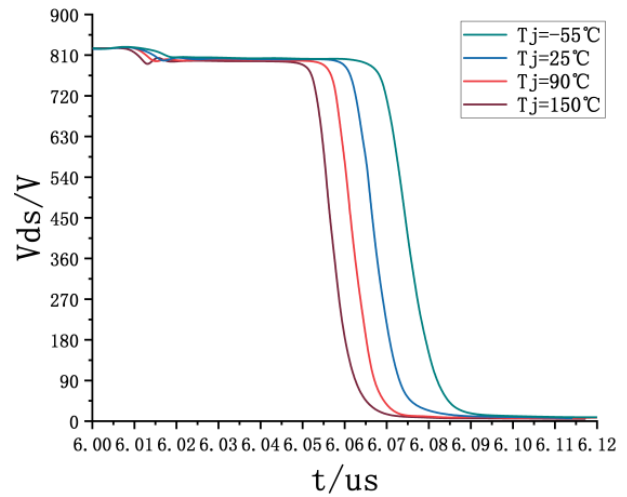


图 15 不同温度下开通漏极电压波形

3.3 不同驱动电阻情况下的开关情况

驱动电阻的大小影响着开关过程的波形，考虑到驱动电阻大小可能带来的问题，将驱动电阻设置成不同的阻值进行电路仿真，如图给出在不同阻值下的开关过程。从仿真的波形可以看出，驱动电阻从 3Ω 增长至 20Ω 时，开通与关断过程中，曲线右移，开关响应变慢，开关时间变长。这表明随着驱动电阻的增加，SiC MOSFET 开

关过程中的开关时间数值上均有明显下降趋势。

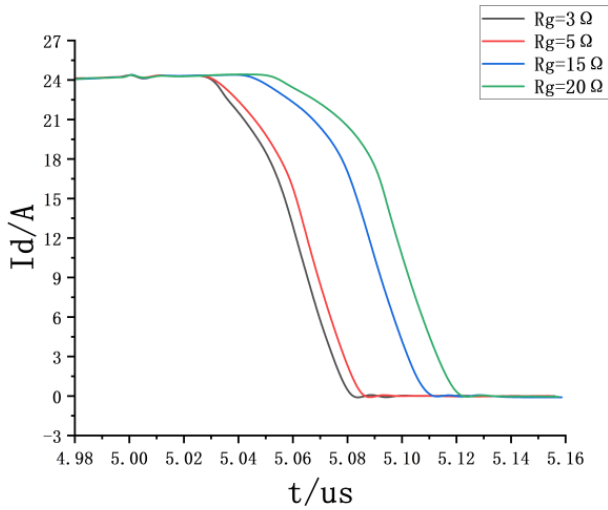


图 16 不同驱动电阻下关断电流波形

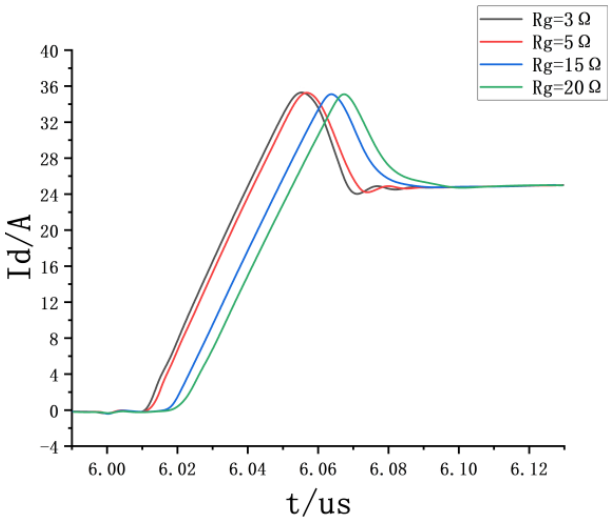


图 17 不同驱动电阻下开通电流波形

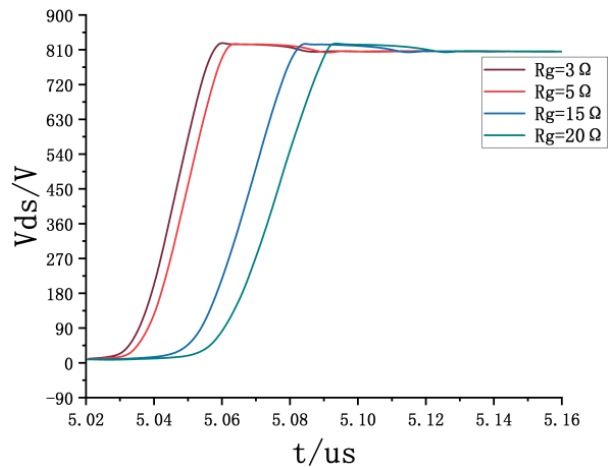


图 18 不同驱动电阻下关断漏极电压波形

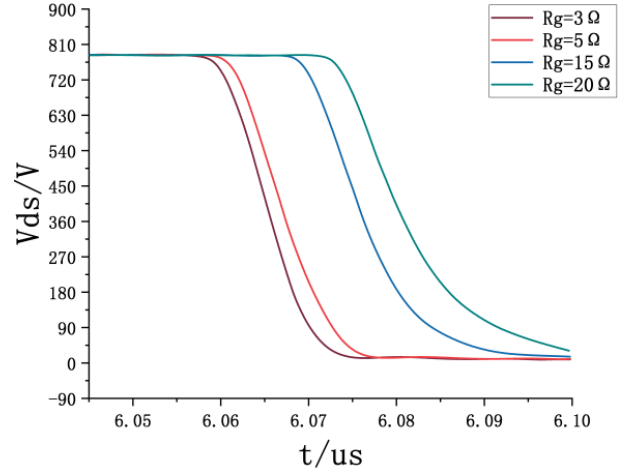


图 19 不同驱动电阻下开通漏极电压波形

4 结论

本文对 SiC MOSFET 的静态特性和动态特性进行了研究，通过分析厂商提供原模型与优化后模型在电路仿真中的特性，对比出优化后模型在开关振荡与尖峰均优于原模型，且开关上升时间与下降时间也在 datasheet 基础上做了提升。通过设置不同温度环境、不同驱动电阻条件下，观察漏源极电压与漏极电流开通关断情况。结果表明，随着温度的上升，在关断过程中，电压电流波形均出现响应时间延长，关断时间增加；在开通过程中，电压电流波形出现响应应加快，开通时间减少。而随着驱动电阻的增加，开通关断过程中，电压电流波形响应延时，开关时间变长。

参考文献

- [1] 麦玉冰, 谢欣荣. 第三代半导体材料碳化硅 (SiC) 研究进展 [J]. 广东化工, 2021, 48 (09): 151-152+155.
- [2] Srdic S, Zhang C, Liang X, et al. A SiC-based power converter module for medium-voltage fast charger for plug-in electric vehicles [C]//2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE, 2016: 2714-2719.
- [3] 孙铭泽. 1200V 碳化硅功率器件测试及建模 [D]. 湘潭大学, 2020.
- [4] 徐国林, 朱夏飞, 刘先正, 温家良, 赵志斌. 基于 PSpice 的碳化硅 MOSFET 的建模与仿真 [J]. 智能电网, 2015, 3 (06): 507-511.
- [5] 许明明, 王佳宁, 冯之健. 基于 SPICE 模型的 SiC MOSFET 静态动态特性分析 [J]. 电力电子技术, 2017, 51 (09): 28-30.

- [6] 候欣蓝. SiC MOSFET PSpice 建模研究 [D]. 西安电子科技大学, 2020.
- [7] J. Martins, M. Nawaz, K. Ilves and F. Iannuzzo, "Development of PSpice modeling platform for 10 kV/100 A SiC MOSFET power module," 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2017, pp. 4358-4365.
- [8] 刘帆, 朱德文, 吴钊, 叶杰. SiC MOSFET 建模及驱动电路设计 [J]. 电力电子技术, 2018, 52 (12): 133-136.
- [9] Millan J, Godignon P, Perpiñà X, et al. A survey of wide bandgap power semiconductor devices [J]. IEEE transactions on Power Electronics, 2013, 29 (5): 2155-2163.
- [10] L. Ceccarelli, F. Iannuzzo and M. Nawaz, "PSpice modeling platform for SiC power MOSFET modules with extensive experimental validation," 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2016, pp. 1-8.
- [11] 孙凯, 陆珏晶, 吴红飞, 邢岩, 黄立培. 碳化硅 MOSFET 的变温度参数建模 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (03): 37-43+17.
- [12] H. Li, X. Zhao, K. Sun, Z. Zhao, G. Cao and T. Q. Zheng, "A Non-Segmented PSpice Model of SiC mosfet With Temperature-Dependent Parameters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 5, pp. 4603-4612, May 2019.
- [13] K. Sun, H. Wu, J. Lu, Y. Xing and L. Huang, "Improved Modeling of Medium Voltage SiC MOSFET Within Wide Temperature Range," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 5, pp. 2229-2237, May 2014.
- [14] 王文月. SiC MOSFET 驱动电路研究与设计 [D]. 天津工业大学, 2021.
- [15] 赵星冉. 宽禁带半导体器件的 PSpice 电路建模与应用 [D]. 北京交通大学, 2019.
- [16] H. Li, X. Zhao, R. Hao and K. Sun, "A non-segmented PSpice model of SiC MOSFETs," IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017, pp. 4823-4828.
- [17] J. Wang et al., "Characterization, Modeling, and Application of 10-kV SiC MOSFET," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 55, no.8, pp. 1798-1806, Aug. 2008.
- [18] 许明明. 宽禁带半导体器件的开关过程建模与分析 [D]. 合肥工业大学, 2018.