

# 高压 eGaN HEMT 开关行为及其影响因素研究

彭子和<sup>1</sup>, 秦海鸿<sup>1</sup>, 张英<sup>1</sup>, 修强<sup>1</sup>, 储师舜<sup>2</sup>

(1. 多电飞机电气系统工业与信息化部重点实验室, 南京航空航天大学, 江苏 南京 211106;  
2. 苏州华碧微科检测技术有限公司, 江苏 苏州 215021)

**摘要:** 为了探究高压 eGaN HEMT 的开关行为及其影响因素, 首先详细分析了 eGaN HEMT 的开关过程, 推导出开关各个阶段的持续时间及影响因素, 并将其归纳为器件参数、驱动电路参数和工况, 通过实验对 eGaN HEMT 开关过程和驱动电路参数以及工况对 eGaN HEMT 高速开关行为的影响规律进行验证, 探究了实际电路中存在寄生电感对开关行为的影响。实验结果表明, 调整驱动电路参数可以提高开关速度, 降低开关损耗, 但不可避免地会引起电压、电流的振荡和过冲, 设计驱动电路时需要折衷考虑, 工况对开关时间影响较大, 桥臂电路应用需要根据不同的工况调整死区时间以达到最优的效果, 寄生电感会使开关过程中的电流、电压出现振荡, 影响开关速度和可靠性, 实验结果为 eGaN HEMT 驱动电路的设计和应用提供了有益的帮助。

**关键词:** eGaN HEMT; 驱动电路; 开关行为; 工况; 驱动电路参数; 寄生电感

**DOI:** 10.12067/ATEEE1902030      **文章编号:** 1003-3076(2020)04-0017-10      **中图分类号:** TM464

## 1 引言

高压增强型氮化镓器件(eGaN HEMT)作为新型宽禁带半导体器件之一,较之于Si器件具有更低的导通电阻、更低的结电容和更好的耐高温工作能力,将其作为制作电力电子变换器的功率器件有望显著提高变换器的最高工作频率、效率,降低体积、重量<sup>[1-6]</sup>,因此高压eGaN HEMT在无线电能传输、电动汽车、新能源发电等领域具有非常广阔的应用前景<sup>[7-10]</sup>。但是,高压eGaN HEMT的特性与传统Si MOSFET有所不同,驱动要求也有所不同,而且其开关速度非常快,开关过程的 $du/dt$ 和 $di/dt$ 非常高,很容易与寄生参数作用引起电压、电流振荡和过冲<sup>[11,12]</sup>。因此如何实现可靠的高速开关给驱动电路的设计和应用带来了更高的挑战<sup>[13,14]</sup>。

目前已有部分文献针对eGaN HEMT的开关特性和驱动电路进行了研究。文献[15]主要对高压eGaN HEMT的稳态特性进行了测试,并进一步探究

了驱动电压、结温对稳态特性的影响。文献[16]通过仿真探究了寄生电感和驱动电阻对eGaN HEMT开关特性的影响以及死区时间对GaN基桥臂电路的影响,并利用实验进行了验证。文献[17]探究了结温和驱动电压对高压eGaN HEMT稳态特性的影响,并通过双脉冲实验研究了负载电流对开关特性的影响。文献[18]从高压eGaN HEMT开关过程振荡问题出发,对寄生电感的影响进行了深入研究,并提出了对应的优化方法。文献[19]从桥臂电路中死区设置的角度出发,对低压eGaN HEMT的开关过程进行建模,从而得出死区设置依据,并通过实验进行了验证。文献[20]在GaN基电机驱动器的设计中探讨了驱动电阻对高压eGaN HEMT开关特性的影响。但是,现有的研究还未系统地探究驱动电路和工况对高压eGaN HEMT的开关特性的影响,无法为eGaN HEMT驱动电路的设计和应用提供指导依据。

本文首先建立了包含寄生参数的双脉冲电路模

**收稿日期:** 2019-02-27  
**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51677089)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(NJ20160047)、南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金项目(kfjj20170308)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KY-CX18\_0287)  
**作者简介:** 彭子和(1996-),男,江苏籍,硕士研究生,研究方向为新型宽禁带半导体器件的特性及其应用;  
秦海鸿(1977-),男,江苏籍,副教授,博士,研究方向为功率变换技术、电机控制、新器件应用研究。

型,分析了 eGaN HEMT 的开关过程,并为开关各个阶段建立了数学模型,利用数学模型分析得出影响 eGaN HEMT 开关特性的因素,将其分为器件参数、驱动电路参数、工况 3 个方面,并通过实验探究了驱动电路参数和工况对 eGaN HEMT 开关时间,电压、电流变化速率、振荡和超调量以及开关能量损耗等开关特性的影响规律,进一步针对实际电路中存在的寄生电感对 eGaN HEMT 的开关行为的影响进行了探究,为 eGaN HEMT 驱动电路的设计和应用提供一定的参考依据。

## 2 开关过程及影响因素分析

图 1 为考虑了寄生参数的 eGaN HEMT 双脉冲测试电路。其中  $Q_1$  为被测 650V eGaN HEMT 器件,  $C_{GS}$ 、 $C_{GD}$  和  $C_{DS}$  分别为栅源极、栅漏极和漏源极间寄生电容,  $R_G$  为栅极回路的等效电阻,包括栅极内部寄生电阻、栅极外部电阻和驱动芯片内阻。  $D_1$  为续流用 SiC SBD,  $C_J$  为其寄生电容;  $L_G$  为栅极回路寄生电感,包括栅极回路走线引入的寄生电感和器件栅极内部寄生电感;  $L_{CS}$  为共源极寄生电感,包括封装内部、源极引脚到驱动回路的走线电感;  $L_D$  为源极走线寄生电感;  $L$  为负载电感。

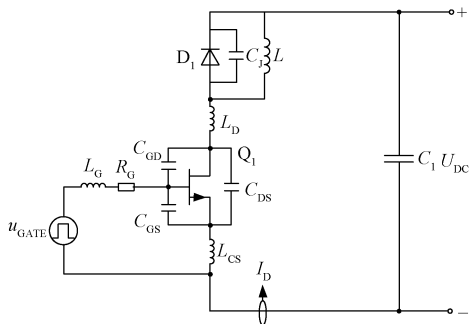


图 1 考虑寄生参数 eGaN HEMT 双脉冲测试电路

Fig.1 Double pulse test circuit considering parasitic parameters

现有商用 650V eGaN HEMT 封装引入的寄生电感低于 0.2nH,经过精心设计的驱动回路引入的寄生电感  $L_G$  和  $L_{CS}$  也可以低于 0.2nH<sup>[18]</sup>,远低于功率回路引入的寄生电感  $L_D$  和  $L_S$ ,因此为了简化分析,在分析其开关过程时忽略  $L_G$ 、 $L_{CS}$  对栅极回路的影响。图 2 为 eGaN HEMT 的典型开关过程波形。

### 2.1 开通过程分析

如图 2 所示,eGaN HEMT 的开通过程可分为 4 个阶段。

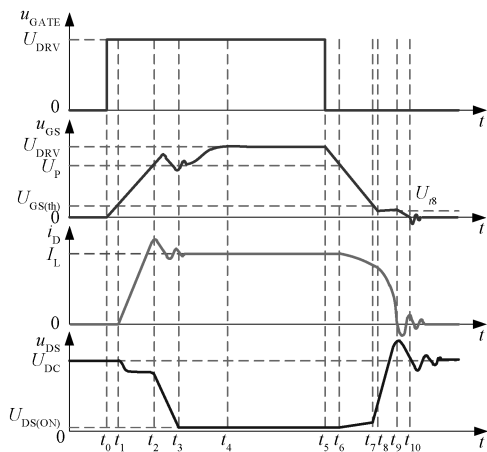


图 2 eGaN HEMT 典型开关过程波形

Fig.2 Typical switch process of eGaN HEMT

#### (1) 阶段 1 [ $t_0, t_1$ ]

$t_0$  时刻,驱动电压  $u_{GATE}$  通过栅极驱动电阻  $R_G$  为输入电容  $C_{iss}$  充电,栅源电压  $u_{GS}$  可表示为:

$$u_{GS} = U_{DRV} (1 - e^{-\frac{t-t_0}{C_{iss}R_G}}) \quad (1)$$

$t_2$  时刻,  $u_{GS}$  上升至阈值电压  $U_{GS(th)}$ ,此阶段结束,  $Q_1$  始终保持关断状态,这一时段的持续时间为:

$$t_1 - t_0 = C_{iss} R_G \ln \frac{U_{DRV}}{U_{DRV} - U_{GS(th)}} \quad (2)$$

由式(2)可知,影响此阶段开通速度的因素是  $R_G$ 、 $C_{iss}$  和  $U_{DRV}$ 。阶段 1 时长与  $R_G$  和  $C_{iss}$  呈正相关,与  $U_{DRV}$  呈负相关。

#### (2) 阶段 2 [ $t_1, t_2$ ]

$u_{GS}$  从  $U_{GS(th)}$  上升到密勒平台电压  $U_P$ ,电感电流由二极管换流至器件沟道,漏极电流  $i_D$  上升,并在  $L_D$  和  $L_{CS}$  上引起感应电压,引起漏源极电压  $u_{DS}$  下降,  $u_{DS}$  可表示为:

$$u_{DS} = U_{DC} - (L_S + L_D + L_{CS}) \frac{di_D}{dt} \quad (3)$$

沟道电流  $i_{ch}$  可以写成:

$$i_{ch} = g_{fs}(u_{GS} - U_{GS(th)}) \quad (4)$$

式中,  $g_{fs}$  为跨导。

此阶段持续时间为:

$$t_2 - t_1 = R_G C_{iss} \ln \frac{U_{DRV} - U_{GS(th)}}{U_{DRV} - U_P} \quad (5)$$

#### (3) 阶段 3 [ $t_2, t_3$ ]

$t_2$  时刻,二极管的等效并联电容  $C_J$  充电,充电电流使得  $i_D$  出现电流尖峰,  $L_D$  与  $C_J$  谐振使得电流波形出现振荡。漏极电流可以写成:

$$i_D = I_L + C_J \frac{du_D}{dt} \quad (6)$$

式中,  $I_L$  为负载电流。

$u_{DS}$  开始下降:

$$u_{DS} = U_{DC} - (L_S + L_D) \frac{di_D}{dt} - u_D \quad (7)$$

式中,  $u_D$  为二极管承受的反向电压。

栅极电流经  $C_{GD}$  给漏极放电,使栅极电位下降,有:

$$C_{GD} \frac{du_{DS}}{dt} = - \frac{U_{DRV} - U_P}{R_G} \quad (8)$$

对式(8)积分得:

$$t_3 - t_2 = \frac{Q_{GD} R_G}{U_{DRV} - U_P} \quad (9)$$

式中,  $Q_{GD}$  为栅漏极电容电荷,  $Q_{GD} = U_{DS} C_{GD}$ 。

$t_3$  时刻, eGaN HEMT 漏源电压下降至沟道电压  $U_{DS(on)}$ , 这个模态结束。

(4) 阶段 4 [ $t_3, t_4$ ]

$t_3$  时刻, 驱动电路继续给  $C_{iss}$  充电,  $u_{GS}$  继续上升, 漏极电流为负载电流  $I_L$ , 漏源极电压为沟道导通电阻降压:

$$U_{DS(on)} = I_L R_{DS(on)} \quad (10)$$

$t_4$  时刻,  $u_{GS}$  上升至  $U_{DRV}$ , 此阶段持续时间为:

$$t_4 - t_3 = 2.3 R_G C_{iss} - R_G C_{iss} \ln \frac{U_{DRV}}{U_{DRV} - U_P} \quad (11)$$

## 2.2 关断过程分析

如图 2 所示, eGaN HEMT 关断过程分为 5 个阶段。

(1) 阶段 1 [ $t_5, t_6$ ]

$t_5$  时刻,  $u_{GATE}$  下降为低电平,  $C_{iss}$  开始通过  $R_G$  放电, eGaN HEMT 始终保持开通状态,  $u_{GS}$  可表示为:

$$u_{GS} = U_{DRV} e^{-\frac{t-t_5}{R_G C_{iss}}} \quad (12)$$

这一阶段的持续时间为:

$$t_6 - t_5 = R_G C_{iss} \ln \frac{U_{DRV}}{U_{GS(th)} + I_L / g_{fs}} \quad (13)$$

(2) 阶段 2 [ $t_6, t_7$ ]

$t_6$  时刻, 栅源电压  $u_{GS}$  降为  $U_P$ :

$$U_P = U_{GS(th)} + I_L / g_{fs} \quad (14)$$

eGaN HEMT 的沟道开始关断, 沟道电阻不断增大, 沟道电流  $i_{ch}$  开始降低, 到  $t_7$  时刻降为 0, 这一时段内  $i_{ch}$  可表示为:

$$i_{ch} = g_{fs} (u_{GS} - U_{GS(th)}) \quad (15)$$

这一阶段内, 负载电流由沟道换流至为  $C_{oss}$  充

电, 虽然沟道关断了, 但是漏极电流几乎没有变化。输出电容充电电流、沟道电流与漏极电流满足:

$$C_{oss} \frac{du_{DS}}{dt} = I_L - i_{ch} \quad (16)$$

$t_5 \sim t_7$  时刻持续时间为:

$$t_7 - t_5 = R_G C_{iss} \ln \frac{U_{DRV}}{U_{GS(th)}} \quad (17)$$

(3) 阶段 3 [ $t_7, t_8$ ]

$t_7$  时刻,  $u_{GS}$  下降到  $U_{GS(th)}$ , eGaN HEMT 的沟道完全关断。  $I_L$  继续为  $C_{oss}$  充电, 直到  $t_8$  时刻,  $u_{GS}$  下降到平台电压  $U_{i8}$ 。这一时段持续时间为:

$$t_8 - t_7 = R_G C_{iss} \ln \frac{U_{DRV}}{U_P} \quad (18)$$

(4) 阶段 4 [ $t_8, t_9$ ]

此阶段内,  $I_L$  继续为  $C_{oss}$  充电,  $u_{DS}$  持续上升,  $t_9$  时刻上升到  $U_{DC}$ 。值得注意的是,  $t_6 \sim t_9$  时段内  $I_L$  为  $C_{oss}$  充电, 将能量储存在其中, 记作  $E_{oss}$ , 这部分能量会在开通过程中通过沟道释放。储存在输出电容中的总电荷  $Q_{oss}$  可表示为:

$$Q_{oss} \Big|_0^{U_{DC}} = I_L (t_9 - t_6) - \int_{t_6}^{t_9} i_{ch} dt \quad (19)$$

(5) 阶段 5 [ $t_9, t_{10}$ ]

$t_9$  时刻起,  $u_{GS}$  继续下降,  $t_{10}$  时刻降至 0。此阶段持续时间为:

$$t_{10} - t_9 = 2.3 R_G C_{iss} - R_G C_{iss} \ln \frac{U_{DRV}}{U_{i8}} \quad (20)$$

## 2.3 开关速度影响分析

通过分析感性负载下 eGaN HEMT 的开关过程, 可知各个阶段开关时间的影响因素, 可以归纳为器件参数、电路参数和工况条件 3 部分, 分别包括:

(1) 器件参数: 输入电容  $C_{iss}$ 、栅漏电容电荷  $Q_{GD}$ 、阈值电压  $U_{GS(th)}$ 、跨导  $g_{fs}$ 。器件参数各自影响的开关阶段有所不同, 输入电容会影响栅源电压的上升速率, 从而影响漏极电流变化速率, 即主要影响开通过程中阶段 1、2 和 4, 以及关断过程中阶段 1、2、3 和 5,  $C_{iss}$  越大, 开关速度越慢。阈值电压主要影响各阶段的持续时间, 对总开关时间影响较小。栅漏电容电荷则主要影响电压变化时间, 即开通阶段 3 和关断阶段 4。跨导主要影响漏极电流变化时间。

(2) 驱动参数: 驱动电阻  $R_G$  和驱动电压  $U_{DRV}$ 。驱动电阻和驱动电压对 eGaN HEMT 整个开关过程都有影响, 是决定 eGaN HEMT 开关特性的重要因素。

(3) 工况条件: 负载电流  $I_L$  和输入电压  $U_{DC}$ 。通过对开关过程的分析可知负载电流越大, 负载电流上升、下降时间越大, 另外负载电流还会影响 eGaN HEMT 关断时的漏源电压上升速度, 负载电流越大, 漏源电压上升速度越大。输入电压主要影响开关过程中漏源电压的变化速率。

另外, 结温也会影响 eGaN HEMT 的开关特性。结温对 eGaN HEMT 开关特性的影响主要体现在对跨导  $g_{fs}$  的影响。eGaN HEMT 转移特性曲线如图 3 所示。随着结温的上升, eGaN HEMT 的跨导  $g_{fs}$  下降, 导致开通过程中的阶段 2 和 3 的持续时间变长, 降低开通时间, 增加开通能量损耗。而在关断过程中, 跨导  $g_{fs}$  降低只会影响阶段 1 和阶段 2 的相互关系, 但是阶段 1 和阶段 2 的总时间却不会发生变化, 因此跨导变化对关断过程的影响较小。

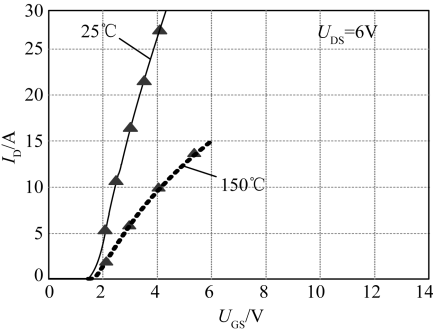


图 3 eGaN HEMT 转移特性曲线  
Fig.3 Transfer characteristic of eGaN HEMT

由于器件参数在器件生产时已经确定, 因此不再进行讨论, 下面通过实验重点讨论驱动参数和工况条件对 eGaN HEMT 开关特性的影响。

2.4 实验验证

为了进一步探究 eGaN HEMT 的开关过程及其开关时间影响因素, 搭建了如图 4 所示的双脉冲测试平台对其进行测试。其中被测 eGaN HEMT 为 GaN Systems 公司型号为 GS66504B 的器件, 其定额为 650V/15A; 续流二极管为 Wolfspeed 公司型号为 C3D06065A 的 SiC SBD, 其定额为 650V/19A; 负载电感为 180μH, 电流探头为 Tektronix 公司的 TCP2020, 高压差分探头采用型号 Tektronix 公司的 P5201; 采用 DSP2812 控制板产生双脉冲触发信号。

图 5 为母线电压为 400V、负载电流为 8A 时测得的 eGaN HEMT 的开关波形。与理论分析相似, eGaN HEMT 的开通过程可分为 4 个阶段: ①  $t_0 \sim t_1$

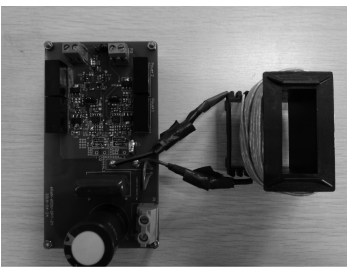


图 4 双脉冲测试平台  
Fig.4 Test rig for double-pulse test

阶段, 驱动电压为 eGaN HEMT 栅源电容充电, eGaN HEMT 沟道尚未打开,  $I_D = 0, U_{DS} = U_{DC}$ ; ②  $t_1 \sim t_2$  阶段,  $u_{GS}$  到达  $U_{GS(th)}$ , 沟道打开,  $I_D$  迅速上升,  $U_{DS}$  略有下降; ③  $t_2 \sim t_3$  阶段,  $u_{GS}$  到达密勒平台,  $U_{DS}$  开始下降; ④  $t_3 \sim t_4$  阶段, eGaN HEMT 已经完全开通,  $u_{GS}$  上升至驱动电压  $U_{DRV}$ 。eGaN HEMT 的关断过程也可分为 4 个阶段: ①  $t_5 \sim t_6$  阶段,  $u_{GATE}$  降为 0,  $C_{iss}$  通过  $R_G$  放电, eGaN HEMT 仍处于完全导通状态,  $U_{DS} = U_{DS(on)}, I_D = I_L$ ; ②  $t_6 \sim t_7$  阶段, eGaN HEMT 沟道开始关断,  $I_L$  为  $C_{oss}$  充电,  $I_D$  略有下降,  $U_{DS}$  开始上升; ③  $t_7 \sim t_8$  阶段, eGaN HEMT 沟道完全关断,  $I_D$  继续为  $C_{oss}$  充电,  $U_{DS}$  上升,  $I_D$  下降; ④  $t_8 \sim t_9$  阶段, eGaN HEMT 完全关断,  $U_{DS}$  上升至  $U_{DC}, I_D$  降为 0,  $u_{GS}$  降至 0。由于 eGaN HEMT 的开关速度比较快, 理论分析关断过程中阶段 3 和阶段 4 反映在实验波形中没有明显的界限, 在实验波形中将理论分析中的阶段 3 和阶段 4 合并作一个阶段。

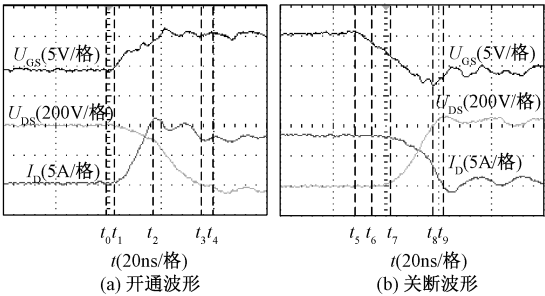


图 5 eGaN HEMT 的开关波形  
Fig.5 Switching waveforms of eGaN HEMT

3 驱动电路参数对 eGaN HEMT 开关的影响

3.1 驱动电阻对 eGaN HEMT 开关特性的影响

实验中,  $U_{DC} = 400V, I_L = 8A, U_{GS} = +6V/0V$ 。

3.1.1 开通驱动电阻对开关特性的影响

图 6 为不同开通驱动电阻  $R_{G(on)}$  下的开关波形。



随着  $R_{G(on)}$  的增大,栅源电压的上升速率有所降低,振荡情况得到抑制,开通过程中的  $di_D/dt$  和  $du_{DS}/dt$  明显下降。由于关断驱动电阻并未改变,因此关断波形几乎没有变化。

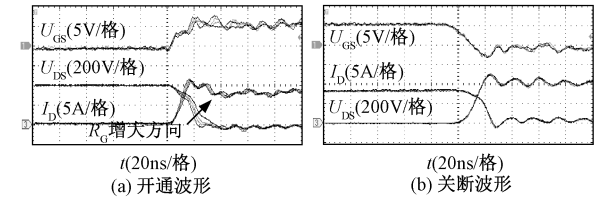


图6 开通驱动电阻对 eGaN HEMT 的开关特性的影响

Fig.6 Effect of turn on resistance on switching characteristics of eGaN HEMT

图7为不同开通驱动电阻  $R_{G(on)}$  下的开关特性。开通过程中电压下降时间和漏极电流上升时间随着  $R_{G(on)}$  的上升而上升,但电流上升时间上升幅度很小。开通时间和电压下降时间相等,关断时间和电流下降时间相等。漏源电压和漏极电流的超调量  $\Delta U_{DS}$ 、 $\Delta I_D$  受  $R_{G(on)}$  的影响很小,开通损耗会随着  $R_{G(on)}$  的增大而增大,开通驱动电阻从  $10\Omega$  增长到  $25\Omega$ ,开通损耗从  $28.3\mu J$  上升至  $44.9\mu J$ ,上升了约60%。

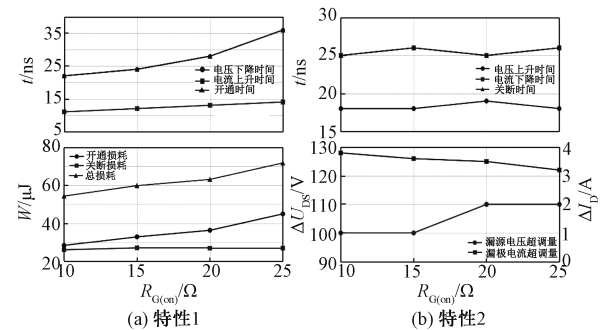


图7 不同开通电阻时的开关特性

Fig.7 Switching features with different turn on resistance

3.1.2 关断驱动电阻对开关特性的影响

图8为不同关断驱动电阻  $R_{G(off)}$  下的开关波形。关断过程中栅源电压的下降速率、 $di_D/dt$  和  $du_{DS}/dt$  都会随着  $R_{G(off)}$  的增大而降低。随着  $R_{G(off)}$  的降低,栅源电压的负向振荡情况加剧。

图9为不同关断电阻  $R_{G(off)}$  下的开关特性。关断过程中,电压、电流变化时间和关断时间都会随  $R_{G(off)}$  的上升而上升,开通时间和电压下降时间相等,关断时间和电压上升时间相等。关断时漏源电压的超调量逐渐下降。关断损耗会随着  $R_{G(off)}$  的增大而上升。

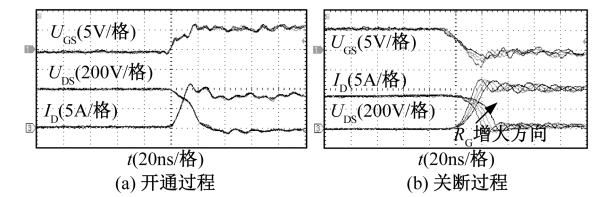


图8 关断驱动电阻对 eGaN HEMT 的开关特性的影响

Fig.8 Effect of turn off resistance on switching characteristics of eGaN HEMT

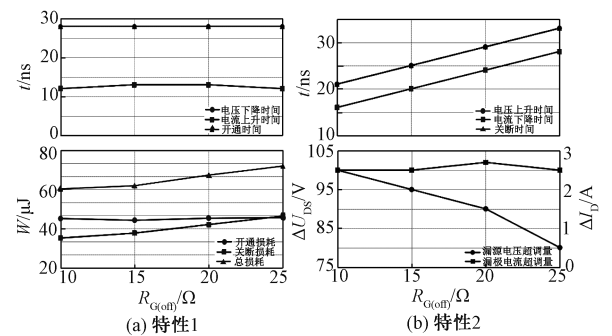


图9 不同关断电阻时的开关特性

Fig.9 Switching features with different turn off resistance

3.2 驱动电压对 eGaN HEMT 开关特性的影响

实验中,  $U_{DC} = 400V$ ,  $I_L = 8A$ ,  $R_G = 20\Omega/15\Omega$ 。

3.2.1 驱动正压对开关特性的影响

图10为不同驱动正压下的开关波形,可以看出开关过程中栅源电压、漏源电压和漏极电流的变化速率都会随着驱动正压的上升而上升。驱动正压上升能够提高开关速度,但也会加剧栅源电压振荡。

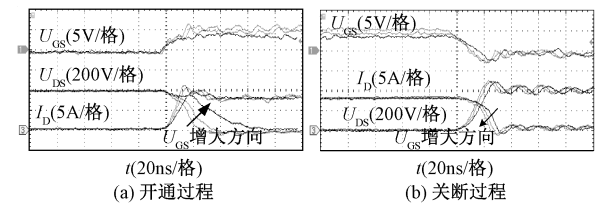


图10 驱动正压对 eGaN HEMT 的开关特性的影响

Fig.10 Effect of positive drive voltage on switching characteristics of eGaN HEMT

图11为不同驱动正压  $U_{GS}$  下的开关特性。开关时间,电压、电流变化时间都会随着驱动正压的上升而下降,其中电压下降时间受驱动正压影响最大,这是因为开通过程中,漏源电压下降时需要从栅极回路汲取电流,栅极电流大小由驱动电阻和驱动正

压决定。开通时间和电压下降时间相等,关断时间和电流下降时间相等。漏源电压超调量和漏极电流超调量都会随驱动正压的上升而增大。开关损耗会随着驱动正压的升高而降低,驱动正压对开通损耗的影响更大,因为驱动正压对开通时漏源电压变化速率影响较大。

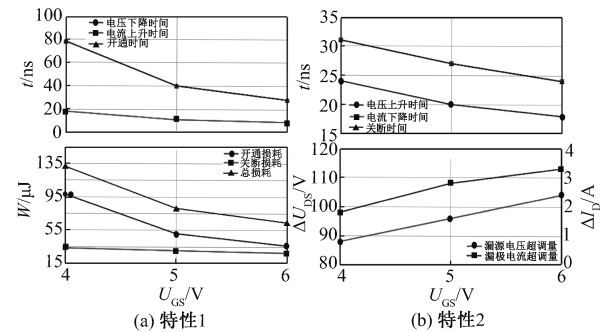


图 11 不同驱动正压时的开关特性

Fig.11 Switching features with different positive drive voltage

3.2.2 驱动负压对开关特性的影响

图 12 为不同驱动负压下的开关波形。驱动负压变化对开通过程影响很小,主要影响关断过程。关断过程中,栅极负压降低时漏源电压和漏极电流的变化速率增大,栅源电压的振荡加剧。

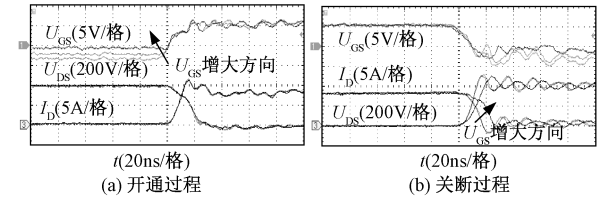


图 12 驱动负压对 eGaN HEMT 的开关特性的影响

Fig.12 Effect of negative drive voltage on switching characteristics of eGaN HEMT

图 13 为不同驱动负压  $U_{GS}$  下的开关特性,开通过程中,随着驱动负压的增大,漏源电压下降时间略有降低,漏极电流上升时间几乎不变。关断过程中漏源电压的上升时间、漏极电流的下降时间和关断时间都会随着驱动负压的上升而增大,开通时间和电压下降时间相等,关断时间和电流下降时间相等。漏源电压超调量和漏极电流超调量有所降低,漏源电压超调量受驱动负压的影响更大。随着驱动负压的上升,eGaN HEMT 开关速度变慢,开关损耗也有所上升,其中关断损耗增幅较大。

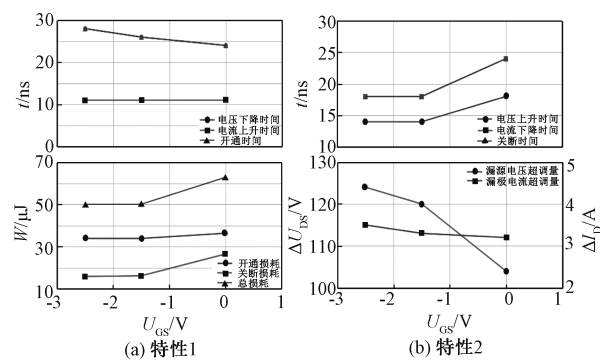


图 13 不同驱动负压时的开关特性

Fig.13 Switching features with different negative drive voltage

4 工况对 eGaN HEMT 开关的影响

4.1 负载电流对 eGaN HEMT 开关特性的影响

实验中,  $U_{DC} = 400V$ ,  $U_{GS} = +6V/0V$ ,  $R_G = 20\Omega/15\Omega$ 。图 14 为不同负载电流下的开关波形。开通过程中,随着  $I_D$  的增大,  $U_{DS}$  下降时间增大,振荡更加剧烈,但是  $di_D/dt$  和  $du_{DS}/dt$  几乎不变。关断过程中,随着  $I_D$  的增大,  $C_{oss}$  的充电速度加快,漏源电压变化率  $dU_{DS}/dt$  增大。开关过程中,漏极电流  $I_D$  的增大会加剧自身振荡,并由于  $L_{CS}$  的耦合作用,加剧  $U_{GS}$  的振荡。

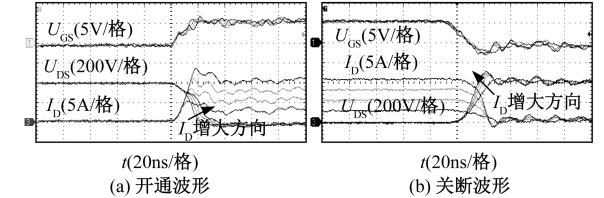


图 14 负载电流  $I_L$  对 eGaN HEMT 的开关特性的影响

Fig.14 Effect of load current on switching characteristics of eGaN HEMT

图 15 为不同负载电流下的开关特性。开通过程中电压、电流变化时间和开通时间均会随着漏极电流的增加而增加。关断过程中电压、电流变化时间和关断时间都随着漏极电流的增加而降低,轻载时漏极电流对关断时间的影响比较大,随着漏极电流的上升,关断时间几乎不再发生变化。开通时间和电压下降时间相等,关断时间和电流下降时间相等。负载电流从 3.5A 增加到 11A 时,漏源电压超调量增加了约 200%,漏极电流超调量增加了约

60%。开通损耗增加了 225%，关断损耗增加了 280%，这主要是因为漏源电压和漏极电流的重叠区域会随着负载电流的增加而增加。

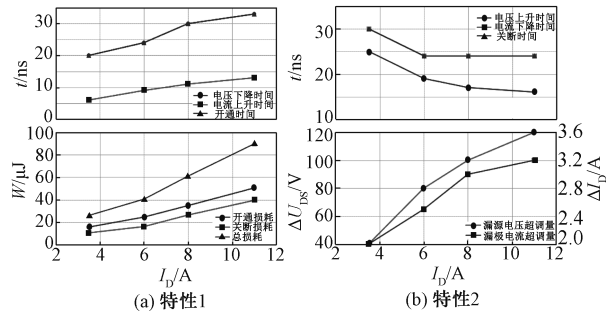


图 15 不同负载电流时的开关特性

Fig.15 Switching features with different load current

4.2 母线电压对 eGaN HEMT 开关特性的影响

实验中,  $I_L = 8\text{A}$ ,  $U_{GS} = +6\text{V}/0\text{V}$ ,  $R_G = 20\Omega/15\Omega$ 。图 16 为不同母线电压下的开关波形。开通过程中, 随着母线电压的增大, 漏源电压下降时间增大, 漏极电流变化速率略有增加, 上升时间略有减小。关断过程中, 漏源电压上升时间增大, 上升速率几乎不变, 漏极电流下降速率变慢, 下降时间变长。

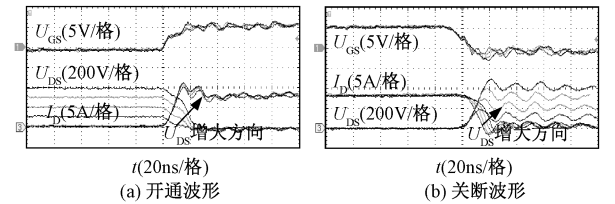


图 16 母线电压对 eGaN HEMT 的开关特性的影响

Fig.16 Effect of DC voltage on switching characteristics of eGaN HEMT

图 17 为不同母线电压  $U_{DS}$  下的开关特性。开关时间会随着母线电压的增加而增加。关断过程中, 电压、电流变化时间会随着母线电压的上升而上升。影响  $U_{DS}$  变化时间的主要因素是  $Q_{GD} = C_{GD} U_{DS} \approx C_{rss} U_{DS}$ ,  $C_{rss}$  为密勒电容, 从 GaN Systems 公司提供的 GS66504B 的数据表可知,  $Q_{GD}$  随着电压的增大而上升, 因此漏源电压的上升、下降时间有所上升, 影响电流变化时间的主要因素为  $C_{iss}$ ,  $C_{iss}$  几乎不受  $U_{DS}$  的影响, 因此电流变化时间几乎不变。开通时间和电压下降时间相等, 关断时间和电流下降时间相等。母线电压变化对  $U_{DS}$  超调量和  $I_D$  超调量几乎没有影响。开关损耗会随着母线电压的增大而增大, 其中母线电压对开通损耗的影响更大。

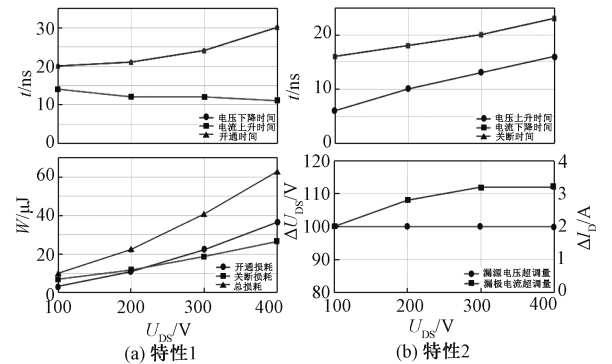


图 17 不同母线电压时的开关特性

Fig.17 Switching features with different DC voltage

5 布局寄生电感对 eGaN HEMT 开关特性的影响

高速开关过程中, 寄生电感的影响也不容忽视, 如图 2 所示, eGaN HEMT 电路中的寄生电感有栅极寄生电感  $L_G$ 、漏极寄生电感  $L_D$  和共源极寄生电感  $L_{CS}$ 。现有商用高压 eGaN HEMT 的封装引入的寄生电感低于  $0.2\text{nH}$ , 且大多采用开尔文结构, 共源极寄生电感一般低于  $0.4\text{nH}$ <sup>[18]</sup>, 布局设计主要影响漏极寄生电感和栅极寄生电感, 因此这里重点考虑  $L_G$  和  $L_D$  对 eGaN HEMT 开关行为的影响。实验中,  $U_{DC} = 400\text{V}$ ,  $I_L = 8\text{A}$ ,  $U_{GS} = +6\text{V}/0\text{V}$ ,  $R_G = 20\Omega/15\Omega$ 。

5.1 栅极寄生电感对 eGaN HEMT 开关特性的影响

图 18 为不同栅极寄生电感  $L_G$  下的开关波形。栅极寄生电感主要影响栅源电压, 对漏源电压和漏极电流几乎没有影响。随着  $L_G$  的增大, 栅源电压的变化速率变慢, 振荡周期变大, 衰减速率降低, 振荡峰值上升。

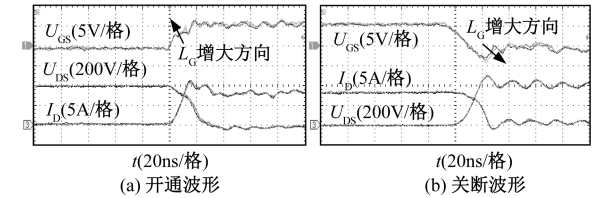


图 18 栅极寄生电感对 eGaN HEMT 的开关特性的影响

Fig.18 Effect of gate parasitic inductance on switching characteristics of eGaN HEMT

图 19 为不同栅极寄生电感  $L_G$  下的开关特性。开通时间和关断时间随着  $L_G$  上升略有上升, 开通时间和电压下降时间相等, 关断时间和电压上升时间相等。开关能量损耗和超调量几乎没有变化。

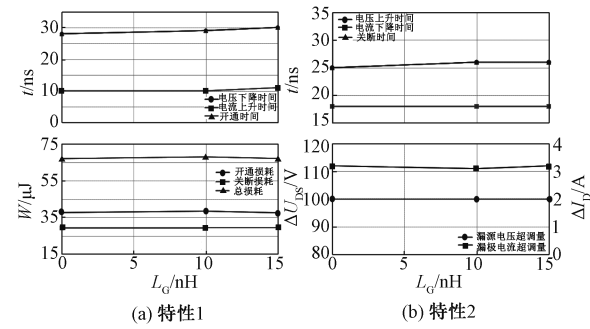


图 19 不同栅极寄生电感时的开关特性  
Fig.19 Switching features with different gate parasitic inductance

5.2 漏极寄生电感对 eGaN HEMT 开关特性的影响

图 20 为不同漏极寄生电感  $L_D$  下的开关波形。随着  $L_D$  的增大,漏极电流和漏源电压的变化速率变慢,振荡加剧,周期变大,同时也会加剧栅源电压的振荡。

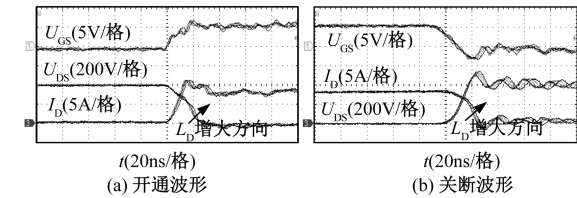


图 20 漏极寄生电感对 eGaN HEMT 的开关特性的影响  
Fig.20 Effect of drain parasitic inductance on switching characteristics of eGaN HEMT

图 21 为不同漏极寄生电感  $L_D$  下的开关特性。开通时间和关断时间都会随着  $L_D$  的增大而增大,相应的开关能量损耗也与  $L_D$  呈正相关关系。漏源电压的超调量也会随着  $L_D$  上升而上升,但  $L_D$  对  $I_D$  的超调量几乎没有影响。

6 结论

作为新型的宽禁带半导体器件,高压 eGaN HEMT 具有高速高温运行能力,可以满足高功率密度电力电子装置的应用要求。本文详细分析了 eGaN HEMT 的开关过程,归纳出影响 eGaN HEMT 开关行为的因素,并对驱动电路参数和工况 2 个方面,共 6 种参数对 eGaN HEMT 开关行为的影响规律进行了实验探究,并进一步探究了实际电路中存在的寄生电感对 eGaN HEMT 开关特性的影响,得到以下结论:

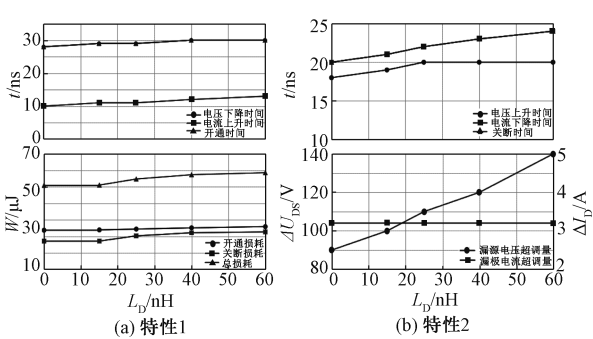


图 21 不同漏极寄生电感时的开关特性  
Fig.21 Switching features with different drain parasitic inductance

(1)不考虑寄生参数影响时,影响 eGaN HEMT 的开关行为的因素可分为器件参数、驱动参数和工况 3 方面,其中可调因素为驱动参数和工况,降低驱动电阻可以提高开关速度,但会引起振荡和电压、电流过冲。提高驱动电压有助于实现高速开关,但同样加剧振荡和过冲问题,驱动正压和负压对开通、关断过程都有影响。

(2)eGaN HEMT 的开通时间会随着负载电流的增大呈近似线性上升,轻载时 eGaN HEMT 关断时间较大,随着负载上升 eGaN HEMT 关断时间几乎不变。eGaN HEMT 开关时间会随母线电压的增加呈近似线性上升,在桥臂应用中,当工况改变,需要注意死区时间的优化设置。

(3)栅极寄生电感增大会加剧栅源电压的振荡,对漏源电压和漏极电流几乎没有影响,漏极寄生电感增大会降低开关速度,增加开关损耗,加剧  $i_D$ 、 $u_{DS}$  和  $u_{GS}$  的振荡。

(4)综合考虑实验结果,eGaN HEMT 参数推荐值为:驱动电压+6V/0V,开通驱动电阻 10~15 $\Omega$ ,关断驱动电阻 10 $\Omega$  左右,在不需要反向导通的场合可适当引入-3V 以内的负压关断,经过精心设计的驱动电路降低了寄生参数,驱动正压可取为+6.5V,关断驱动电阻可适当减小。

参考文献 (References):

[ 1 ] Jones E A, Wang F, Ozpineci B. Application based review of GaN HFETs [ A ]. IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications [ C ]. Knoxville, TN, USA, 2014. 24-29.  
[ 2 ] 张波, 陈万军, 邓小川, 等 (Zhang Bo, Chen Wanjun, Deng Xiaochuan, et al.). 氮化镓功率半导体器件技术 (Gallium nitride power semiconductor device technology)



- [J]. 固体电子学研究进展 (Research & Progress of SSE), 2010, 30 (1): 1-10.
- [3] 李媛, 马红波, 柯玉连 (Li Yuan, Ma Hongbo, Ke Yulian). 基于 GaN HEMT 的高效率、高功率密度 LLC 谐振变换器的设计 (Design of high efficiency and high power density GaN-based LLC converter) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (10): 58-64.
- [4] Millan J, Godignon P, Perna X, et al. A survey of wide bandgap power semiconductor devices [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29 (5): 2155-2163.
- [5] 黎晓, 马红波, 庞亮 (Li Xiao, Ma Hongbo, Pang Liang). 基于 SiC MOSFET 的无桥 Boost PFC 变换器研究与设计 (Research and design of SiC MOSFET based dual-Boost bridgeless PFC rectifier) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (10): 65-70.
- [6] 李艳, 张雅静, 黄波, 等 (Li Yan, Zhang Yajing, Huang Bo, et al.). Cascode 型 GaN HEMT 输出伏安特性及其在单相逆变器中的应用研究 (Research on output volt-ampere characteristics of Cascode GaN HEMT and its application in single-phase inverter) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (14): 295-303.
- [7] 郑心城, 陈为 (Zheng Xincheng, Chen Wei). 电动汽车无线充电的磁耦合结构综述 (Overview of magnetic coupling structure in wireless charging for electric vehicle) [J]. 电气技术 (Electrical Engineering), 2017, 18 (1): 9-15.
- [8] 周念成, 蒲松林, 王强钢, 等 (Zhou Niancheng, Pu Songlin, Wang Qianggang, et al.). 电动汽车快速充电站的储能缓冲系统控制策略 (Control strategy of energy storage buffer system for fast charging electric vehicle station) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2013, 41 (17): 127-134.
- [9] Zhang L, Born R, Zhao X, et al. A high efficiency inverter design for Google little box challenge [A]. IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications [C]. Blacksburg, VA, USA, 2015. 319-322.
- [10] Zhang X, Yao C, Lu X, et al. A GaN transistor based 90W AC/DC adapter with a buck-PFC stage and an isolated quasi-switched-capacitor DC/DC stage [A]. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition [C]. Fort Worth, TX, USA, 2014. 109-116.
- [11] Zhang Z, Zhang W, Wang F, et al. Analysis of the switching speed limitation of wide band-gap devices in a phase-leg configuration [A]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition [C]. 2012. 3950-3955.
- [12] Zhang X, Shen Z, Haryani N, et al. Ultra-low inductance vertical phase leg design with EMI noise propagation control for enhancement mode GaN transistors [A]. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition [C]. Long Beach, CA, USA, 2016. 1561-1568.
- [13] Li H, Li X, Zhang Z, et al. Design consideration of high power GaN inverter [A]. Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications [C]. Fayetteville, AR, USA, 2016. 23-29.
- [14] Li H, Zhang X, Zhang Z, et al. Design of a 10kW GaN-based high power density three-phase inverter [A]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition [C]. Milwaukee, WI, USA, 2016. 1-8.
- [15] Haryani N, Zhang X, Burgos R, et al. Static and dynamic characterization of GaN HEMT with low inductance vertical phase leg design for high frequency high power applications [A]. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition [C]. Long Beach, CA, USA, 2016. 1024-1031.
- [16] Lautner J, Piepenbreier B. Analysis of GaN HEMT switching behavior [A]. International Conference on Power Electronics and ECCE Asia [C]. Seoul, Korea, 2015. 567-574.
- [17] Jones E A, Wang F, Costinett D, et al. Cross conduction analysis for enhancement-mode 650-V GaN HFETs in a phase-leg topology [A]. 2015 IEEE 3rd Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA) [C]. Blacksburg, VA, USA, 2015. 98-103.
- [18] 王路 (Wang Lu). 高压大功率 GaN 器件开关过程振荡问题分析及应用设计研究 (Analysis of oscillation during switching process and application design of high-voltage and high-power GaN HEMT) [D]. 北京: 北京交通大学 (Beijing: Beijing Jiaotong University), 2017.
- [19] Han D, Sarlioglu B. Dead time effect on GaN-based synchronous boost converter and analytical model for optimal dead time selection [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (1): 601-612.
- [20] Lautner J, Piepenbreier B. High efficiency three-phase-inverter with 650V GaN HEMTs [A]. International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management [C]. Nuremberg, Germany, 2016. 1-8.

Analysis of switching behavior and influence factor  
of high voltage eGaN HEMT

PENG Zi-he<sup>1</sup>, QIN Hai-hong<sup>1</sup>, ZHANG Ying<sup>1</sup>, XIU Qiang<sup>1</sup>, CHU Shi-shun<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for More-Electric-Aircraft Power System of Ministry of Industry and Information Technology,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;  
2. FALAB Laboratory Company, Suzhou 215021, China)

**Abstract:** In order to clarify the switching behaviour and influence factors of high voltage eGaN HEMT, the detailed switching process of eGaN HEMT with loop parasitic parameters is analyzed and the duration of each stage and its influence factors are confirmed which can be inducted as device parameter, drive circuit parameter and working condition. The switching process of eGaN HEMT and the influence of driver circuit parameter and working condition are verified through the experiment, then the influence of parasitic inductance on switching characteristics of eGaN HETM is explored. The result shows that adjusting drive circuit parameter can speed up the switching process and reduce the switching loss, but will inevitably cause oscillation and overshoot of voltage and current, which need to be tradeoff. The working condition has great influence on the switching time of eGaN HEMT, so the dead time need to be adjusted according to different working conditions in bridge arm circuit. The parasitic inductance will induce the oscillation in current and voltage during the switching process and will have influence on the switching speed and reliability. The conclusions may be helpful for the design of drive circuit and application of high eGaN HEMT.

**Key words:** eGaN HEMT; drive circuit; switching behavior; working condition; drive circuit parameter; parasitic inductance