

650V eGaN HEMT 短路特性研究

张英¹, 秦海鸿¹, 彭子和¹, 修强¹, 荀倩²

(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. 查尔姆斯理工大学, 瑞典 哥德堡 999034)

摘要: 增强型 GaN HEMT(eGaN HEMT) 可以大幅提升变换器的效率和功率密度, 具有广泛的应用前景。但实际应用中由桥臂串扰引起的误导通, 以及负载侧短路等都会导致 eGaN HEMT 流过较大的电流。因此, 为了确保 eGaN HEMT 在过载、短路等工况下安全可靠工作, 必须深入探究 eGaN HEMT 的短路工作原理以及电路参数对其短路特性的影响。本文首先建立了硬开关模式下的短路测试平台对 eGaN HEMT 的短路过程进行了研究, 并利用 eGaN HEMT 热网络模型, 分析了其短路过程中结温变化情况, 进一步地探究了不同结温对其短路特性的影响。在此基础上对不同电路参数对 eGaN HEMT 短路特性的影响进行研究和对比, 揭示了影响 eGaN HEMT 短路特性关键因素, 为 eGaN HEMT 短路保护设计提供了一定的指导。

关键词: 增强型 GaN HEMT; 短路特性; 短路保护; 温度依赖性

DOI: 10.12067/ATEEE1811055 **文章编号:** 1003-3076(2020)02-0010-11 **中图分类号:** TM464

1 引言

作为新型宽禁带半导体器件之一, 氮化镓高电子迁移率晶体管(Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor, GaN HEMT)比 Si 器件具有更低的导通电阻、更快的开关速度和更高的结温工作能力, 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^[1-5]。增强型氮化镓高电子迁移率晶体管(Enhancement Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor, eGaN HEMT)由于其常断特性和众多的应用功率等级(15~650V、3.4~120A)^[2], 受到了广泛关注, 研究人员已研制出了多种基于 eGaN HEMT 的变换器, 涵盖了无线电能传输、电机驱动、光伏发电等领域^[5-10]。然而, 在实际应用中, eGaN HEMT 的开关速度较快, 栅极阈值电压较低(<2V), 桥臂电路中高速开关时, 可能会由于桥臂串扰现象, 导致桥臂误导通问题^[11], 此外变换器、负载等都可能发生故障, 出现短路现象。这些都会导致 eGaN HEMT

器件在短时间内流过数倍于额定电流的短路电流, 因此为了保证 eGaN HEMT 的正常使用, 提高变换器的可靠性, 需要充分认识 eGaN HEMT, 特别是 650V 电压等级 eGaN HETM 的短路原理和短路特性, 探究电路参数对其短路特性的影响, 为 eGaN HEMT 的短路保护设计、驱动电路设计和变换器整机设计提供帮助。

研究人员已对 Si IGBT 和 Si MOSFET 等 Si 基功率器件的短路特性有了较为充分的认识^[12-14]。近年来, 科研工作者也开始对 SiC MOSFET 的短路特性进行研究^[15-17]。由于 eGaN HEMT 独特的平面型结构和导通机理, 原有的研究结果很难直接用于 eGaN HEMT。目前针对 600/650V 电压等级的 GaN HEMT 的短路特性研究还比较少。文献[18]对不同母线电压和关断电压 650V 常通型 GaN HEMT 的短路特性进行了探究。文献[19]探究了不同母线电压下 600V GaN GIT 的短路特性, 并提出了提高 GaN GIT 短路能力的建议。文献[20]探究了 100V eGaN HEMT 对脉冲电流的承受能力, 但并未指出其

收稿日期: 2018-11-30
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)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX18_0287)
作者简介: 张英(1993-), 男, 河北籍, 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。

失效原因。文献[21]对 650V eGaN HEMT 进行了重复性测试,探究多次短路对 eGaN HEMT 工作特性的影响。但是,现有的研究缺乏对 eGaN HEMT 的短路过程、短路原理的探究与分析,忽略了驱动回路参数对 eGaN HEMT 短路的影响,无法为 eGaN HEMT 的保护电路和驱动电路设计提供较为全面的依据。

本文首先建立了硬开关模型下的短路测试平台,对 eGaN HEMT 的短路工作原理进行研究,并利用 eGaN HEMT 的热网络模型,对其短路过程中结温变化情况进行了分析,进一步地探究了不同结温对其短路特性的影响。在此基础上对不同电路参数对 eGaN HEMT 短路特性的影响进行对比和研究,揭示了短路特性的关键影响因素,为 eGaN HEMT 短路保护设计提供了一定的指导。

2 eGaN HEMT 短路特性测试与分析

2.1 短路故障类型及实验平台搭建

功率器件的短路故障模式可分为硬开关故障和负载故障,其中硬开关故障下,功率器件功率损耗更大,发热更严重,对器件的考验更为严峻,因此为了探究 eGaN HEMT 的短路特性和短路能力,采用硬开关故障测试的方式。图 1(a)为硬开关故障模式下 eGaN HEMT 短路测试原理图,其中 L_{stray} 为功率回路中从输入电容到被测器件之间的杂散电感,包括 PCB 走线的寄生电感和器件内部引线的寄生电感,约为 200nH,功率回路中的寄生电阻很小,忽略不计,图 1(b)为测试平台实物图。

2.2 eGaN HEMT 短路原理分析

短路特性测试中使用 GaN Systems 公司型号为 GS66504B 的 650V/15A eGaN HEMT,开通驱动电压设置为 6V,关断驱动电压设置为 0,开通驱动电阻设置为 20Ω ,关断驱动电阻设置为 15Ω 。图 2 为母线电压设置为 300V 时的短路测试典型波形,在硬开关故障下,eGaN HEMT 短路时可分为 4 个阶段。

t_0 时刻之前,eGaN HEMT 处于截止状态。此时直流母线电压 U_{DC} 直接加在 eGaN HEMT 漏源两端。

阶段 1 [t_0, t_1]: t_0 时刻,eGaN HEMT 开通。由于功率回路寄生电感很小,阻抗很低,eGaN HEMT 的漏极电流迅速上升,开关管由截止区转移到饱和区。快速变化的短路电流与杂散电感相互作用,感应出与母线电压极性相反的电压 $U_{L\text{stray}}$,导致 eGaN HEMT 的漏源电压出现下降。 $U_{L\text{stray}}$ 可表示为:

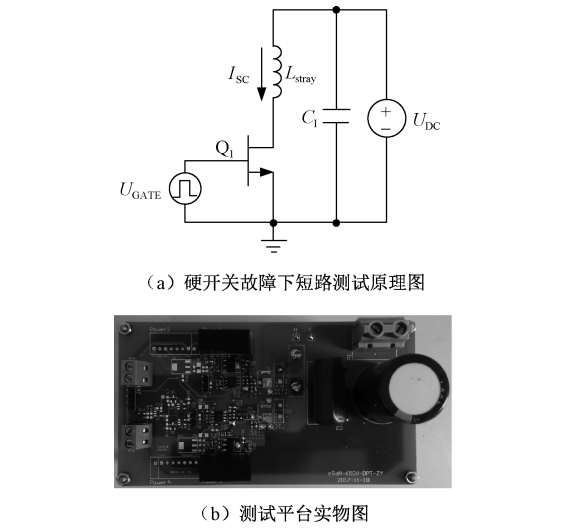


图 1 硬开关模式下短路测试平台原理图及实物图
Fig.1 Schematic diagram and prototype of hard switching fault short circuit test circuit

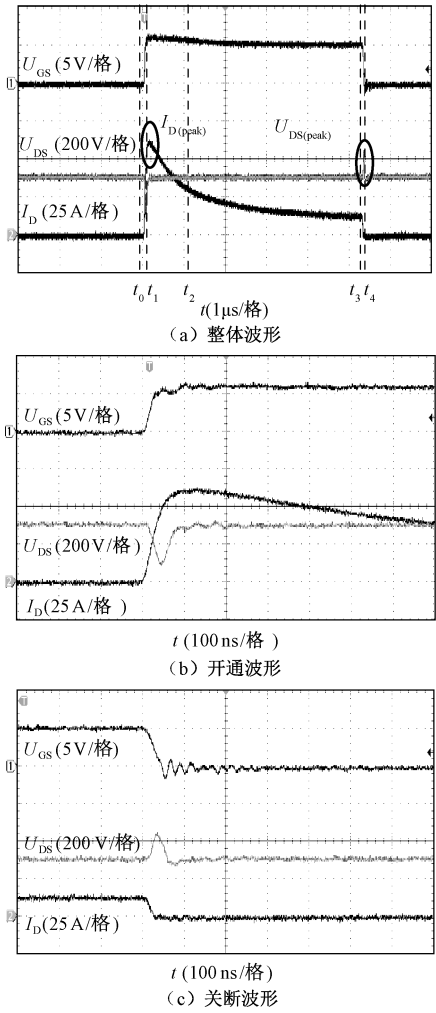


图 2 eGaN HEMT 短路过程典型波形
Fig.2 Typical short circuit waveform of eGaN HEMT

$$U_{L_{\text{stray}}} = L_{\text{stray}} \frac{di_D}{dt} \tag{1}$$

式中, L_{stray} 为功率回路中从输入电容到被测器件之间的杂散电感; i_D 为漏极电流。

此时 eGaN HEMT 的漏源电压 U_{DS} 为:

$$U_{\text{DS}} = U_{\text{DC}} - U_{L_{\text{stray}}} \tag{2}$$

如图 2(b) 所示, 短路电流上升过程中, 上升速率 di_D/dt 不断下降, 寄生电感 L_{stray} 的感应电压逐渐降低, 漏源电压 U_{DS} 逐渐回升, 当短路电流达到峰值, 即漏极电流处于饱和值时, 漏源电压达到稳定值。

阶段 2 $[t_1, t_2]$: t_1 时刻短路电流达到最大值, 在此之后短路电流迅速下降, t_2 时刻下降至峰值电流的 1/2 处。由于短路电流峰值较高, 此阶段内 eGaN HEMT 的结温迅速上升, eGaN HEMT 的沟道电子迁移率与结温呈较强的负相关关系 (T^{-k} , T 为结温, k 为温度系数), 即结温越高, 沟道电子迁移率越低^[21]。由于结温的升高, 电子迁移率降低, 导通电阻迅速上升, 短路电流快速下降。同时随着短路时间的增加, 栅源电压出现明显的下降, 表明栅极电流 I_G 有所上升, 这是因为随着沟道温度的上升, 穿过栅源极间绝缘介质层的电场逐渐加强。

阶段 3 $[t_2, t_3]$: 此阶段内由于结温仍在升高, 导通电阻继续上升, 短路电流持续下降, 但是由于此时短路电流已经下降至较低值, 因此结温上升速率变缓, 导通电阻和短路电流的变化速率也减慢。栅源电压 U_{GS} 仍在继续下降, 到 t_3 时刻, 栅源电压下降至 5.4V, 栅极电流约为 35mA, GS66504B 栅极电流的典型值为 80μA, 此时栅极电流约为典型值的 437 倍。

阶段 4 $[t_3, t_4]$: t_3 时刻, eGaN HEMT 关断, 短路电流下降, di_D/dt 为负, 与功率回路中的寄生电感 L_{stray} 相互作用感应出与直流母线电压极性相同的电压, 令 eGaN HEMT 漏源电压出现尖峰。 t_4 时刻后 eGaN HEMT 完全关断, 短路过程结束。

$t_0 \sim t_4$ 时间内, eGaN HEMT 导通产生的能量损耗即为短路能量 E_C , 可表示为:

$$E_C = \int_{t_0}^{t_4} u_{\text{DS}} i_D dt \tag{3}$$

3 热网络模型分析

为了充分探究 eGaN HEMT 的短路特性, 还需关注其短路过程中的结温变化情况。由于短路持续

时间较短, 热量集中于管芯附近, 很难通过外部的仪器探测到管芯温度变化, 通常会对器件进行建模, 构建热网络模型, 将短路过程中芯片上的耗散功率施加在对应的热网络模型中, 获取不同条件下的结温。图 3 为制造商提供的热网络模型及结构, eGaN HEMT 的热网络模型分为四层, 分别为 GaN 层、Si 衬底、连接层和铜基底。表 1 列出了每一层的热阻 R_θ 、热容 C_θ 及对应的时间参数 τ 。

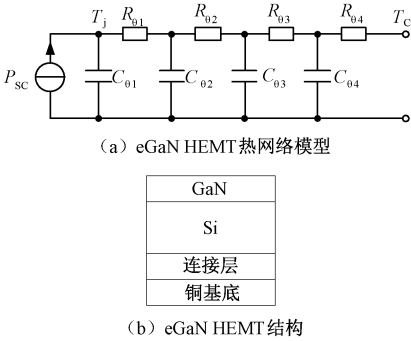


图 3 eGaN HEMT 热网络模型及其结构
Fig.3 Thermal model of eGaN HEMT

表 1 eGaN HEMT 热网络模型参数

Tab.1 eGaN HEMT thermal model parameters

位置	热阻 R_θ /($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	热容 C_θ /($(\text{W}\cdot\text{s})/^{\circ}\text{C}$)	时间常数 τ/ms
GaN 层	0.03	2.12×10^{-5}	6.36×10^{-4}
Si 衬底	0.487	1.48×10^{-3}	0.72
连接层	0.441	3.33×10^{-4}	1.47
铜基底	0.042	5.04×10^{-4}	0.21

由表 1 可知, GaN 层热阻容的时间常数最小, 仅有 0.636μs, Si 衬底和连接层热阻容时间常数达到了 ms 级别, 而 eGaN HEMT 的短路耐受时间一般为几十微秒^[21], 意味着短路过程中产生的热量扩散到外界前, 短路过程已经结束, 因此可以认为短路测试中管芯与外部环境保持绝热状态, 短路过程中产生的热量完全在管芯上。

图 4 是利用 LTSpice 软件对 eGaN HEMT 短路过程的仿真结果, 其中母线电压设置为 300V, 驱动电阻为 20Ω, 驱动电压为 6V。可以看到漏极电流的变化趋势与实验结果相同, 短路故障发生时, 漏极电流迅速上升, 峰值约为 60A, 达到饱和峰值后, 短路电流迅速下降, 短路过程发生 1μs 后, 短路电流下降趋势放缓。图 4 中还给出了短路过程中结温 T_j 和环境温度 T_c 的变化曲线, 可以看到短路故障发生后, 漏极电流迅速上升, 很快达到峰值, 对应仿真所

得结温 T_j 为 26°C , 此时所测得的漏极电流可认为是常温下 eGaN HEMT 漏极电流的饱和值。此后结温 T_j 迅速上升, 对应短路电流迅速下降。当结温 T_j 下降速度放缓, 进入相对平稳的阶段时, 短路电流也进入相对平稳的阶段, 此时结温约为 167°C 。另外, eGaN HEMT 的环境温度 T_c 始终维持在 25°C , 表明短路过程中热量几乎都集中在管芯上, 与对热网络的分析相符。

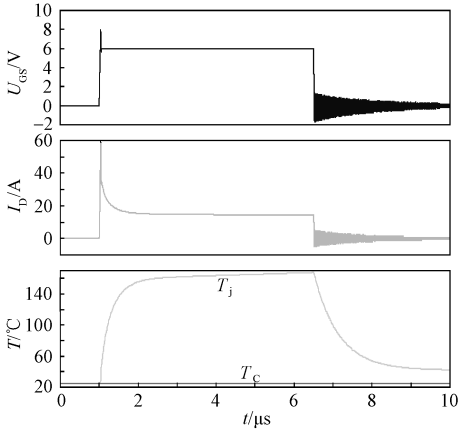


图4 eGaN HEMT 短路过程仿真波形 ($T_c = 25^\circ\text{C}$)

Fig.4 eGaN HEMT short circuit simulation waveforms ($T_c = 25^\circ\text{C}$)

短路电流是短路过程中较为重要的参数,也是功率器件在短路过程中漏极电流的饱和值。对于 eGaN HEMT,漏极电流饱和值与沟道载流子迁移率 μ_0 、速度饱和度 v_{sat} 和栅源阈值电压 $U_{\text{GS(th)}}$ 有关,速度饱和度 v_{sat} 主要与功率器件的极间电压有关,实验中极间电压没有发生变化,因此速度饱和度 v_{sat} 可认为不变,栅源阈值电压 $U_{\text{GS(th)}}$ 几乎不受结温的影响,也可认为不变,而沟道载流子迁移率受结温影响较大,因此 eGaN HEMT 漏极电流饱和值主要受结温的影响,即其短路过程中漏极电流的变化主要与结温变化有关。式(4)为短路过程中 eGaN HEMT 漏极电流与结温的关系, k 为温度系数,大多数文献中取 $1.3 \sim 1.5$ 。但是当 k 取为 1.5 时,由式(4)可知电流饱和值下降 70% 时对应的结温为 425°C , 与仿真结果不符,根据仿真结果计算,电流饱和值下降 70% 时,对应的 k 值约为 3,这表明 eGaN HEMT 的温度系数 k 会随着结温的上升而上升,有文献提出这是因为 AlGaIn/GaN 形成的二维电子气 (Two Dimensional Electron Gas, 2DEG) 中的有效电子质量会随着结温的上升而上升,从而引发了 k 值的上升^[22]。

$$I_{\text{Dmax}}(T) = I_{\text{Dmax}}(T_0) \left(\frac{T_0}{T} \right)^k \quad (4)$$

式中, T_0 为初始结温; I_{Dmax} 为漏极电流饱和值; k 为温度系数。

4 电路参数对 eGaN HEMT 短路特性的影响

影响 eGaN HEMT 短路特性的参数主要有直流母线电压、驱动电阻和驱动电压,其中驱动电阻包括开通驱动电阻和关断驱动电阻。根据对 eGaN HEMT 短路典型波形的分析,在探究电路参数对其短路特性时主要关注以下 4 个方面:

- (1) 短路电流,包括短路电流峰值 $I_{\text{D(peak)}}$, 短路电流变化率 di_{D}/dt 和关断时短路电流值 $I_{\text{D(off)}}$ 。
- (2) 关断时的漏源电压尖峰 $U_{\text{DS(peak)}}$ 。
- (3) 栅源电压 U_{GS} 。
- (4) 短路能量 E_{C} 。

4.1 母线电压

直流母线电压变化范围设置为 $50 \sim 300\text{V}$, 每升高 50V 测试一次。图 5 为不同直流母线电压下的 U_{DS} 、 I_{D} 和 U_{GS} 短路波形。可看到随着直流母线电压的上升,短路电流上升速率不断变快,母线电压从 50V 上升至 300V , di_{D}/dt 从 0.25A/ns 上升至 1A/ns 。母线电压从 50V 上升到 200V , 短路电流峰值也会逐渐上升,但是当 U_{DC} 高于 200V 后,短路电流的峰值几乎不再变化, U_{DC} 为 300V 时短路电流甚至略有下降,这是因为短路电流的饱和峰值受到结温 T_j 的限制,母线电压上升,短路电流的上升速率增大,二者共同造成 eGaN HEMT 的功率损耗增大,结温 T_j 上升速度加快,短路电流更快地到达峰值,并且由于结温的增大,短路电流达到峰值之后,下降速度也会增加。以母线电压为 300V 为例,其短路电流峰值为 64A ,下降到 25A 时只需要 $1.2\mu\text{s}$, $5\mu\text{s}$ 之后下降至 17A (26.5%)。

随着母线电压的增大,短路能量上升,结温增大,短路过程结束时栅源电压逐渐降低, U_{DC} 为 50V , 短路过程结束时 U_{GS} 为 6V , 而当 U_{DC} 上升至 300V 时,短路过程结束时 U_{GS} 为 5.4V 。短路过程中栅极电流上升和栅源电压的下降只是一种暂时现象,短路过程结束之后,进行双脉冲测试,栅极电流和栅源电压恢复正常状态。另外,母线电压上升至 300V 时,短路过程结束时漏极电流为 11A , 已经在 GS66504B 的额定电流范围内,此时栅源电压下降时

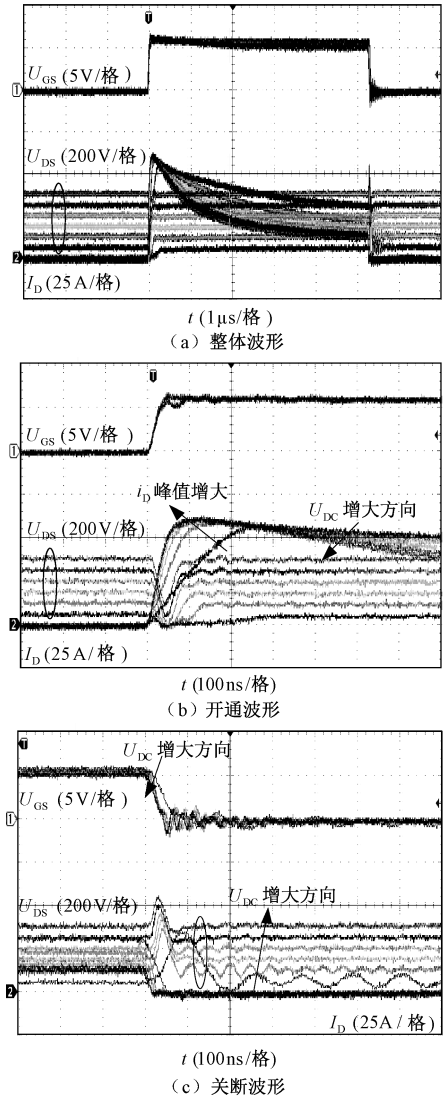


图 5 不同直流母线电压 U_{DC} 下的 U_{DS} 、 U_{GS} 和 I_D 短路波形

Fig.5 Short circuit waveform of U_{DS} , U_{GS} and I_D for different DC bus voltages

间约为 40ns,而在双脉冲测试中,300V/11A 关断时,eGaN HEMT 的栅源电压下降时间小于 20ns。

4.2 驱动电阻

4.2.1 开通驱动电阻 $R_{G(on)}$

实验中直流母线电压设置为 300V,开通驱动电阻 $R_{G(on)}$ 分别取 10Ω、15Ω、20Ω、25Ω 和 30Ω。图 6 为不同开通驱动电阻 $R_{G(on)}$ 下的 U_{DS} 、 I_D 和 U_{GS} 短路波形。开通过程中,随着开通驱动电阻 $R_{G(on)}$ 的增大,eGaN HEMT 的栅源电压上升速率降低,振荡减弱,漏极电流上升速率和峰值有所降低, $R_{G(on)}$ 从 10Ω 上升至 30Ω,短路电流的 di_D/dt 从 1.11A/ns 下降至 0.83A/ns,漏源电压的下降幅度略有降低。

改变开通驱动电阻对关断过程中漏极电流和漏源电压几乎没有影响,但是短路过程结束时栅源电压会随着 $R_{G(on)}$ 的增大而降低。开通驱动电阻从 10Ω 上升到 30Ω,短路过程结束时栅源电压从 5.6V 下降至 5.2V,对应的栅极电流从 40mA 下降至 31mA,这主要是因为随着开通驱动电阻上升,短路能量略有下降,结温略有降低,栅源极间电场强度减弱。

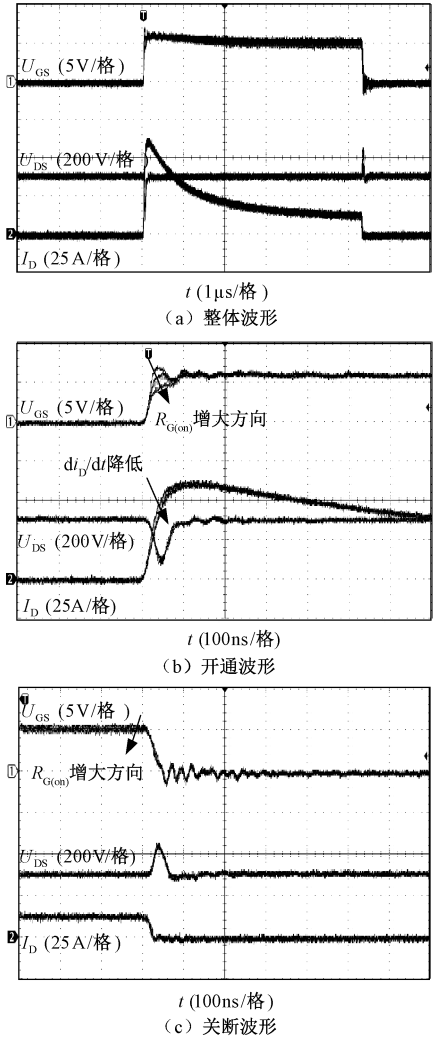


图 6 不同开通驱动电阻 $R_{G(on)}$ 下的 U_{DS} 、 I_D 和 U_{GS} 短路波形

Fig.6 Short circuit waveform of U_{DS} , I_D and U_{GS} for different $R_{G(on)}$

4.2.2 关断驱动电阻 $R_{G(off)}$

图 7 为关断驱动电阻 $R_{G(off)}$ 分别取 15Ω、20Ω 和 30Ω 时的 U_{DS} 、 I_D 和 U_{GS} 短路波形,可以看到改变关断驱动电阻对开通过程几乎没有影响,只会影响关断过程。随着关断驱动电阻的增大,关断过程中栅源电压下降速率有所降低,漏极电流下降速度略

有降低,漏源电压超调量减小,但是关断驱动电阻对关断过程影响很小。

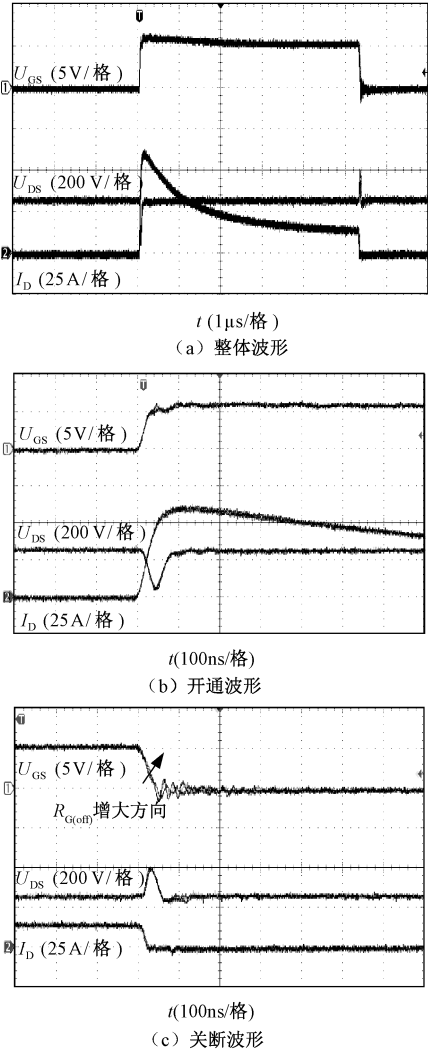


图 7 不同关断驱动电阻 $R_{G(off)}$ 下的 U_{DS} 、 I_D 和 U_{GS} 短路波形

Fig.7 Short circuit waveform of U_{DS} , I_D and U_{GS} for different $R_{G(off)}$

4.3 驱动电压

实验中直流母线电压设置为 300V,开通驱动电阻 $R_{G(on)}$ 取为 20Ω ,关断驱动电阻 $R_{G(off)}$ 取为 15Ω ,驱动电压分别取为 4V、5V 和 6V。图 8 为不同驱动电压下的 U_{DS} 、 I_D 和 U_{GS} 的短路波形,可以看到栅极驱动电压对 eGaN HEMT 短路电流影响比较明显。开通过程中,随着驱动电压的上升,开通速度加快,短路电流上升速度变快,从 4V 上升到 6V 时, di_D/dt 从 $0.625A/ns$ 上升到 $1A/ns$,同时短路电流峰值也出现明显上升,由于短路电流上升更快、峰值更高,自发热更严重,驱动电压为 6V 时,短路电流上升至

峰值后下降速度更快。关断过程中,驱动电压升高会加快栅源电压下降速度,对漏极电流几乎没有影响,但是漏源电压超调量会有所上升,栅源电压振荡情况稍有加剧。驱动电压取为 4V、5V 和 6V 时,短路过程结束时栅源电压变化量分别为 0.4V、0.6V 和 0.8V,表明短路过程结束时栅极电流会随着驱动电压的上升而上升。

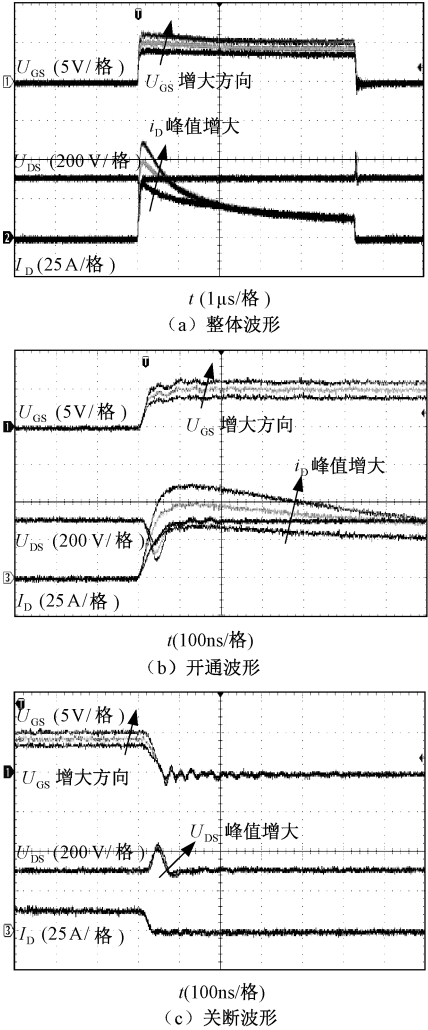


图 8 不同栅源驱动电压 U_{GS} 下的 U_{DS} 、 I_D 和 U_{GS} 短路波形

Fig.8 Short circuit waveform of U_{DS} , I_D and U_{GS} for different U_{GS}

4.4 参数影响分析

为了更加深入地探究各电路参数对 eGaN HEMT 短路特性的影响,对各参数与短路电流峰值 $I_{D(peak)}$ 、关断时短路电流值 $I_{D(off)}$ 、关断时漏源电压过压 ΔU_{DS} 和短路能量 E_c 的关系进行了量化分析。

4.4.1 对短路电流峰值 $I_{D(peak)}$ 的影响

图 9 为短路电流峰值 $I_{D(peak)}$ 与各参数的关系曲线,可以看到短路峰值电流会随着母线电压的上升而上升,但是上升幅度很小,从 50V 上升至 300V 的过程中,短路峰值电流最多变化 6.5%。驱动电阻对短路峰值电流几乎没有影响。驱动电压对短路峰值电流影响较大,驱动电压越大,短路峰值电流越高,栅极驱动电压为 6V 时的短路电流峰值是栅极驱动电压为 4V 时的 1.7 倍,随着驱动电压的上升,短路电流峰值上升速率变慢。

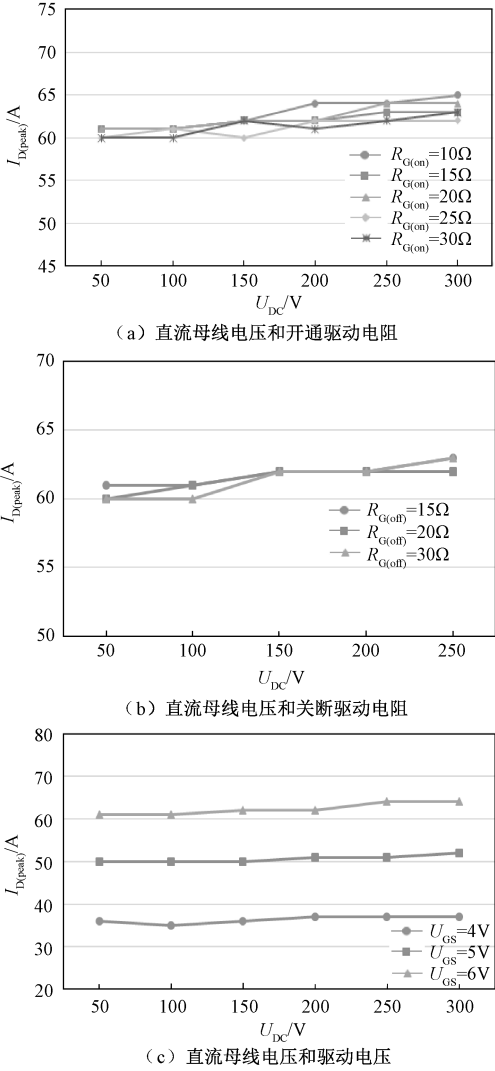


图 9 短路峰值电流 $I_{D(peak)}$ 与各参数关系曲线

Fig.9 Relation curve of short current peak $I_{D(peak)}$ versus circuit parameters

4.4.2 对关断时短路电流 $I_{D(off)}$ 的影响

关断时的短路电流越大,关断过程中漏源电压超调量越大,栅源电压的振荡情况越剧烈。图 10 为

关断时短路电流与各参数的关系,如图 10 所示,驱动电阻对关断时的漏极电流影响很小,母线电压和驱动电压影响较大。随着母线电压的升高,短路过程结束的漏极电流逐渐降低,母线电压较低时 ($<150V$),关断时的漏极电流受母线电压影响较大,且此时驱动电压对其影响较大,驱动电压越高,关断时漏极电流越大,而当母线电压较高时 ($>150V$) 漏极电流的下降幅度趋于平缓,驱动电压不再影响关断时的漏极电流大小。

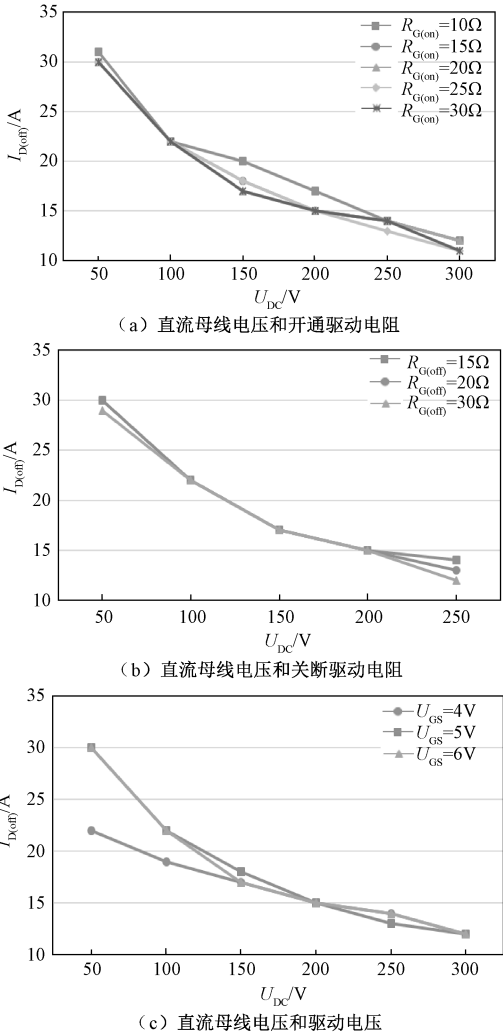


图 10 关断时短路电流 $I_{D(off)}$ 与各参数关系曲线

Fig.10 Relation curve of short-circuit current at the end $I_{D(off)}$ versus circuit parameters

4.4.3 对关断时漏源电压过压 ΔU_{DS} 的影响

图 11 为关断时漏源电压过压与各参数的关系曲线,可以看到,随着直流母线电压的上升,关断过压整体呈下降趋势,直流母线电压较低时 ($<150V$) 关断过压下降比较明显,直流母线电压较高时

(>150V)关断过压趋于稳定,下降速度缓慢,局部还会出现轻微上升。开通驱动电阻对关断时漏源电压过压的影响较小,随着开通驱动的上升,关断过压有所下降,但下降幅度约为 20V,变化幅度仅为 5%。关断驱动电阻对关断过压的影响也比较小, $R_{G(off)}$ 越小,关断速度越快,回路寄生电感引起的关断过压越高。驱动电压对关断过压的影响较大,随着驱动电压的升高,关断过压有所上升,关断过压与关断速度和关断时的短路电流大小有关,驱动电压上升,关断速度加快,母线电压较低时(<150V),驱动电压上升对关断时电流影响较大,因此此时驱动电压对关断过压的影响较为明显,随着母线电压的升高(>150V),关断时电流几乎不再发生变化,驱动电压对关断过压的影响逐渐减弱。

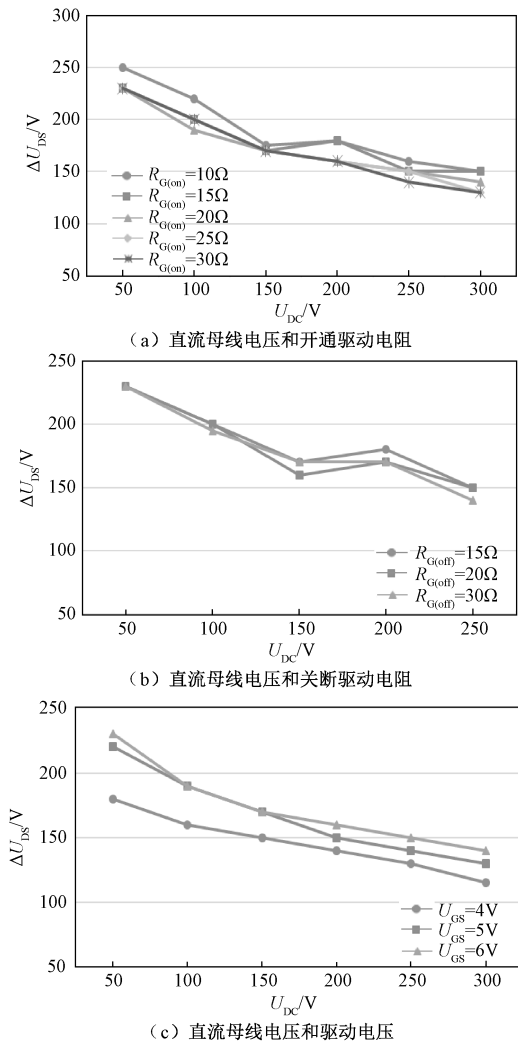


图 11 关断时漏源电压超调量 ΔU_{DS} 与各参数关系曲线

Fig.11 Relation curve of voltage overshoot ΔU_{DS} versus circuit parameters

4.4.4 对短路能量 E_C 的影响

图 12 是短路能量 E_C 与各电路参数的关系图,随着母线电压的上升,短路能量不断增大,但是上升速度会出现明显下降,这是因为随着短路能量不断增加,结温迅速上升,eGaN HEMT 的自发热导致其导通电阻迅速增大,增加母线电压对短路电流的影响越来越小,此时短路能量上升只与母线电压幅值有关。短路能量会随着开通驱动电阻的上升而下降,但下降幅度很小,仅有 3%,关断驱动电阻则几乎不会影响短路能量。由上述分析可知,栅极驱动电压对短路峰值电流、关断时短路电流、短路电流上升速率都有较为明显的影响,故其对短路能量影响也较为明显,二者呈正相关关系,但值得注意的是,驱动电压从 4V 上升到 5V,短路能量上升幅度为 15%~20%,但是驱动电压从 5V 上升到 6V 时,短路能量上升幅度约为 3%。

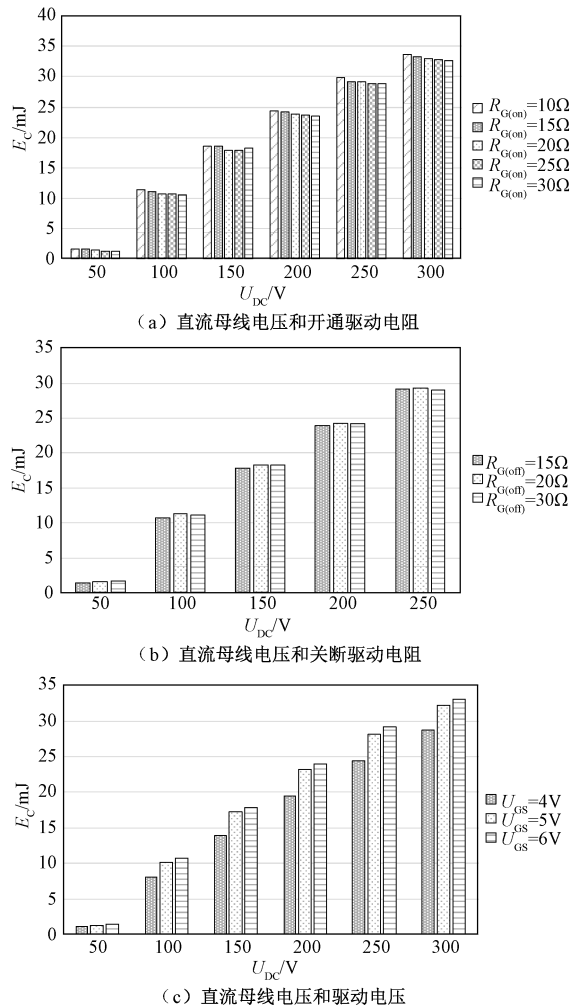


图 12 短路能量 E_C 与各电路参数关系图

Fig.12 Relation graph of short circuit energy E_C versus circuit parameters

4.5 结温对 eGaN HEMT 短路特性的影响

图 13 为不同环境温度下的短路波形,可以看到随着初始环境温度的升高,整体的温度也较 25℃ 环境温度条件下的更高,稳定时结温约为 210℃。 T_c 为 25℃,结温达到 160℃ 所需时间为 2 μs, T_c 为 100℃ 时,结温达到 160℃ 所需时间为 1.3 μs,缩短了 53%。仿真得到的结温是管芯的平均结温,实际使用中管芯的温度分布并不平衡,短路现象发生时热量甚至只会集中在芯片中一小部分,这表明工作环境温度升高时,eGaN HEMT 的短路耐受能力会出现较为明显的下降。另外 eGaN HEMT 短路时的饱和峰值电流会随着环境温度的上升而下降,仿真结果表明环境温度为 100℃ 时,短路电流峰值仅有 30A,是 25℃ 时测量值的 1/2,因此在为 eGaN HEMT 设计短路保护电路时,若采用检测短路电流的手段判断短路故障,需要考虑环境温度的影响。

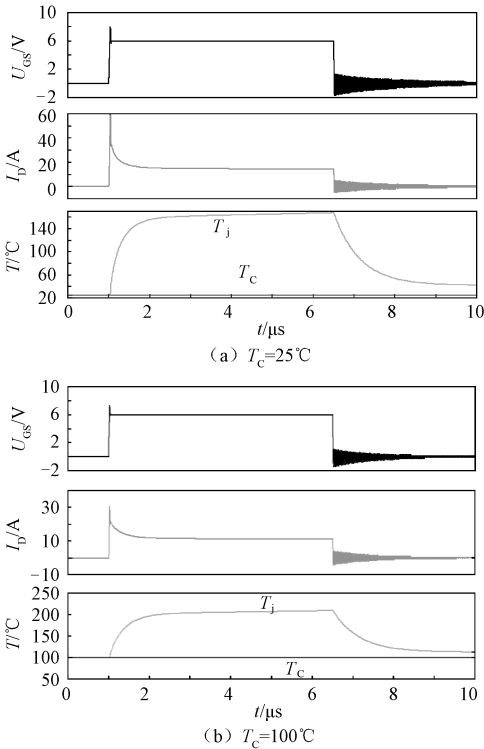


图 13 不同环境温度下的 U_{DS} 、 I_D 和 U_{GS} 短路波形

Fig.13 Short circuit waveform of U_{DS} , I_D and U_{GS} for different T_c

5 结论

本文针对 650V eGaN HEMT 的短路原理及电路参数对其短路特性的影响这一关键问题,建立了硬

开关模式下的短路测试平台,通过实验对 650V eGaN HEMT 的短路过程和原理进行了测试和分析,并从热量的角度,利用 eGaN HEMT 热网络模型,对其短路过程中结温变化情况进行了分析,进一步地探究了不同结温对其短路特性的影响。在此基础上对不同电路参数对 eGaN HEMT 短路特性的影响进行对比和研究,得到以下结论:

- (1) 短路故障发生时 eGaN HEMT 的漏极电流在 200ns 内上升至峰值,随后快速下降,2~3 μs 内就可下降至峰值的 1/2,表明 eGaN HEMT 的自发热现象较为强烈,自身即能有效限制短路电流,有益于器件短路保护。
- (2) 直流母线电压 U_{DC} 增大时,eGaN HEMT 短路过程中短路电流峰值 $I_{D(peak)}$ 会有所上升,但上升幅度很小,短路电流上升速率 di_D/dt 都会有所上升,短路电流更快到达峰值,关断时的短路电流和过压都会出现明显的下降,短路能量有所上升,且上升速率逐渐变缓。
- (3) 驱动电阻 R_G 对 eGaN HEMT 的短路特性几乎没有影响。驱动电压 U_{GS} 对 eGaN HEMT 的短路特性的影响较大,降低驱动电压能够明显降低短路电流峰值和关断时的漏源过压。在母线电压较低时 (<150V),还能有效降低关断时的电流,设计短路保护电路时,为关断 eGaN HEMT 可适当降低栅源电压,有益于 eGaN HEMT 安全关断。

随着结温升高,eGaN HEMT 的短路耐受会出现明显下降,饱和电流也会迅速下降,为 eGaN HEMT 设计短路保护电路时,若采用检测短路电流的手段判断短路故障,需要考虑环境温度的影响。

本文中主要针对 650V eGaN HEMT 在完全导通时,对硬开关条件下的短路特性进行研究,探讨不同工况因素对短路电流大小的影响,揭示相关内在关系,以便支撑整机设计。但是在桥臂电路中,存在桥臂串扰导致的误导通问题,使得桥臂出现短时直通现象,这种不完全导通情况下的短路问题与完全导通时的短路特性存在一定的区别,在今后的研究中可做进一步的分析与探讨。同时,根据 eGaN HEMT 的短路特性,可进一步研究其短路保护技术,以提高 eGaN HEMT 工作的可靠性。

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] 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, 88.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 巴腾飞, 李艳, 梁美 (Ba Tengfei, Li Yan, Liang Mei). 寄生参数对 SiC MOSFET 栅源极电压影响的研究 (The effect of parasitic parameters on gate-source voltage of SiC MOSFET) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (13): 64-73.
- [6] 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 (4): 9-15.
- [7] Zhang L, Born R, Zhao X, et al. A high efficiency inverter design for Google little box challenge [A]. 2015 IEEE 3rd Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA) [C]. 2015. 319-322.
- [8] 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]. 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014 [C]. 2014. 109-116.
- [9] 王旭东, 朱义诚, 赵争鸣, 等 (Wang Xudong, Zhu Yicheng, Zhao Zhengming, et al.). 驱动回路参数对碳化硅 MOSFET 开关瞬态过程的影响 (Impact of gate-loop parameters on the switching behavior of SiC MOSFETs) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2017, 32 (13): 23-30.
- [10] 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]. 2016. 1-8.
- [11] Jones E A, Wang F, Costinett D, et al. Cross conduction analysis for enhancement-mode 650V 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.
- [12] Lefebvre S, Khatir Z, Saint-Eve F. Experimental behavior of single-chip IGBT and COOLMOS devices under repetitive short-circuit conditions [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, 52 (2): 276-283.
- [13] Fuhrmann J, Klauke S, Eckel H. IGBT and diode behavior during short-circuit type 3 [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2015, 62 (11): 3786-3791.
- [14] Wu R, Wang H, Pedersen K B, et al. A temperature-dependent thermal model of IGBT modules suitable for circuit-level simulations [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52 (4): 3306-3314.
- [15] Nguyen T, Ahmed A, Thang T V, et al. Gate oxide reliability issues of SiC MOSFETs under short-circuit operation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (5): 2445-2455.
- [16] Sun J, Xu H, Wu X, et al. Short circuit capability and high temperature channel mobility of SiC MOSFETs [A]. 2017 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD) [C]. Sapporo, Japan, 2017. 399-402.
- [17] 秦海鸿, 徐克峰, 王丹, 等 (Qin Haihong, Xu Kefeng, Wang Dan, et al.). SiC MOSFET 短路特性 (Short circuit characteristics of SiC MOSFET) [J]. 南京航空航天大学学报 (Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics), 2018, 50 (3): 348-354.
- [18] Huang X, Lee D Y, Bondarenko V, et al. Experimental study of 650V AlGaN/GaN HEMT short-circuit safe operating area (SCSOA) [A]. 2014 IEEE 26th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD) [C]. Waikoloa, HI, USA, 2014. 273-276.
- [19] Fernández M, Perpina X, Roig J, et al. P-GaN HEMTs drain and gate current analysis under short-circuit [J]. IEEE Electron Device Letters, 2017, 38 (4): 505-508.
- [20] Ray W B, Schrock J A, Bilbao A V, et al. Analysis of GaN power MOSFET exposure to pulsed overcurrents [A]. 2015 IEEE Pulsed Power Conference (PPC) [C]. Austin, TX, USA, 2015. 1-5.
- [21] Li H, Li Xiao, Wang X D, et al. E-mode GaN HEMT short circuit robustness and degradation [A]. 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) [C]. Cincinnati, OH, USA, 2017. 1995-2002.
- [22] Aminbeidokhti A, Dimitrijević S, Han J, et al. The power law of phonon-limited electron mobility in the 2-D electron gas of AlGaN/GaN hetero structure [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2016, 63 (5): 2214-2218.

Analysis of short-circuit characteristics of eGaN HEMT

ZHANG Ying¹, QIN Hai-hong¹, PENG Zi-he¹, XIU Qiang¹, XUN Qian²

- (1. Center for More-Electric-Aircraft Power System, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
- 2. Chalmers University of Technology, Göteborg 999034, Sweden)

Abstract: eGaN HEMT has great application prospect due to the ability to significantly enhance efficiency and power density of converters. However, unintended turn on caused by cross talk or short circuit in load may cause eGaN HEMT to withstand large current in these applications. Thus, in order to ensure the safety and reliability of eGaN HEMT power devices in the overload and short circuit, etc, it is important to explore the short circuit principle and characteristic of eGaN HEMT, and the influence of circuit parameters on short circuit characteristics. In this paper, the short circuit test platform is established to analyse the short circuit process of eGaN HEMT. Then, the eGaN HEMT thermal network model is used to analyze the junction temperature during the short circuit, and explores the effects of different junction temperature on the short circuit characteristics. Furthermore, the influence of different circuit parameters on the short-circuit characteristics is studied and compared to reveal the key factor influencing short circuit characteristics, which provides some guidance for the design of short circuit protection of eGaN HEMT.

Key words: E-mode GaN HEMT; short-circuit characteristics; short-circuit protection; temperature dependence