

# 一种 GaN 功率器件驱动电路优化设计

张欣,潘三博

(上海电机学院 电气学院,上海 201306)

**摘要:**针对 GaN 功率器件在应用的过程中可能出现误导通、电压尖峰与振铃、过电压、过电流等问题,通过简要分析 GaN 功率器件驱动回路、过电压、过电流故障问题出现原因,设计一种 GaN 功率器件独立拉灌输出、过电流分级保护栅极驱动电路。当 GaN 功率器件出现额定电流两倍以内的过电流现象时,可实现 GaN 功率器件快速关断;当 GaN 功率器件出现额定电流两倍以上过电流现象时,可实现 GaN 功率器件缓慢关断,对 GaN 开关器件电流故障做出动作保护。利用 LT-spice 仿真软件和实验平台的搭建,验证设计的合理性。

**关键词:** GaN 功率器件;栅极驱动;振铃;过电流保护

**中图分类号:** TM 23 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd22367

## Optimal Design of Gallium Nitride Power Device Driving Circuit

ZHANG Xin, PAN Sanbo

(School of Electric Power Engineering, Shanghai Dianji University,  
Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Gallium nitride (GaN) power devices in the process of application may appear misdirection, voltage peak and ringing, overvoltage, overcurrent problems. According to briefly analyze the dynamic characteristics of GaN power devices and the causes of fault problems, an independent pull irrigation output and overcurrent classification protection gate driver of GaN power device was designed. When the over-current phenomenon within two times of the switch tube occurs, the switch tube can be quickly turned off. When the over-current phenomenon of the switch tube occurs more than twice, the switch tube can be slowly turned off to protect the device. The rationality of the design was verified by LT-spice simulation software and the establishment of experimental platform.

**Key words:** GaN power device; gate driver; ringing; overcurrent classification protection

GaN 功率器件在实际应用中,由于其自身特性,令变换器具有更高的开关频率、更快的开关速度、更大的功率密度、更低的功率损耗和更小的体积。但其驱动电压范围窄、阈值低,更易造成驱动误通、栅极击穿问题<sup>[1]</sup>。其开关速度快,在应用过程中易产生开关振荡与开关损耗<sup>[2]</sup>。GaN 功率器件应用在变换器过程中可能会发生过电压、过电流等现象,抑制了 GaN 功率器件在实际应用的可靠性<sup>[3]</sup>。因此需要设计相应的驱动电路,保证开关器件在变换器中的可靠利用。文献[4]提出了 GaN 功率器件谐振驱动技术,实验验证

了整机效率提高的可行性。文献[5]从 GaN 驱动电路 PCB 设计、驱动电阻、驱动回路优化三个方面提出了一种抑制的 GaN 功率开关器件抑制振铃方法。

本文从 GaN 功率器件驱动特性分析,以 GS66508B, 650 V 增强型 GaN 为开关器件搭建 Boost 变换器,分析其过电压、过电流现象原因,对 GaN 栅极驱动电路进行优化设计,解决 GaN 功率开关器件在驱动过程中可能误通、振铃、过电压、过电流等问题。采用一种过电流分级保护电路;当功率器件出现 2 倍以内的过电流现象时,采

**基金项目:** 国家自然科学基金(61973209)

**作者简介:** 张欣(1995—),女,硕士研究生,Email:2310570241@163.com

**通讯作者:** 潘三博(1974—),男,博士,研究生导师,Email:pansb@sdju.edu.cn

用封锁栅极驱动电压方法实现功率管的快速关断,当开关管额定电流出现2倍以上过电流现象时,采用缓关断方法令栅极电压逐渐降为零。采用这种方法可以对不同的过电流故障做出及时的反应,并进行动态保护。利用 LT-spice 仿真软件对设计电路进行了仿真分析,并通过搭建实验平台对其驱动电路设计的合理性进行了验证。

## 1 GaN 功率器件驱动要素分析

GaN 功率器件应用在电力电子产品中提升变换器效率和功率密度<sup>[6-9]</sup>。将硅基 MOS 功率器件与 SiC 功率器件比较, GaN 功率器件驱动电压范围为-10 V~+7 V,栅级门极电压一般为 1.7 V 左右,驱动电压范围窄<sup>[10]</sup>。常规的驱动芯片都不适用于 GaN 功率器件,因此根据 GaN 功率器件特性,设计驱动电路,令 GaN 功率器件在实际应用中发挥其优越性。

### 1.1 GaN 功率器件栅极驱动回路分析

如图 1 所示,采用独立拉灌式输出驱动方式驱动 GaN 功率器件。当功率器件正常开通时,其电流回路为栅极驱动器-开通电阻( $R_{on}$ )-栅极等效电阻( $R_G$ )-开关管-漏极等效电感( $L_S$ )-GND。当功率器件正常关闭时,电流回路为功率器件- $L_C$ - $R_C$ - $R_{off}$ -GND。在 GaN 功率器件在开通与关断期间,等效的谐振环路不同,为了严格抑制之间的谐振,需要严格控制栅极环路中的电阻,最好的解决办法就是利用分离式充放电回路对 GaN 功率器件进行驱动,通过调整开通与关断阻尼,调整器件开通与关断的速度,减少回路中振铃情况,令 GaN 功率器件发挥更好的开关性能。

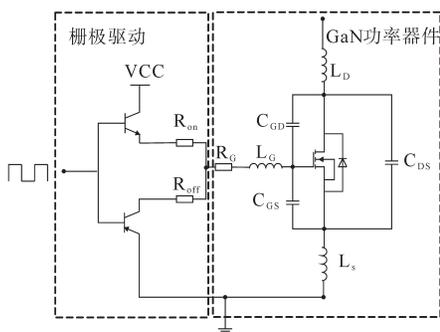


图1 GaN 功率器件开通与关断回路图

Fig.1 GaN power device circuit diagram of turn-on and turn-off

GaN 功率器件等效模型中存在容性与感性器件,在器件关断瞬间,会产生较高  $dv/dt$  与  $di/dt$ ,作用在 GaN 功率器件上会产生关断振铃,误导

通,令功率器件功能失效。

### 1.2 GaN 功率器件过电压、过电流分析

基于 GaN 功率器件搭建 Boost 变换器,等效电气模型如图 2 所示,对 GaN 功率器件源极-漏极产生过电压现象进行分析。

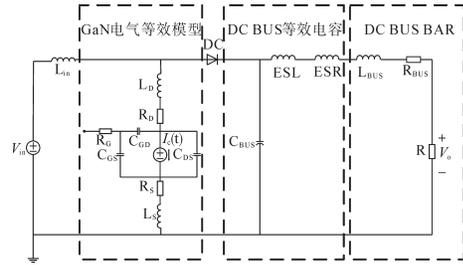


图2 Boost 变换器等效电气模型

Fig.2 Equivalent electrical model of Boost converter

如图 2 所示,用于表示 GaN 功率器件源-漏极电压  $U_{DS}$  表达式为

$$U_{DS} = V_0 + K_s(L_G + L_D + L_{BUS} + ESL + ESR + R_S + R_D + R_{BUS})\left(\frac{di_D}{dt}\right)_{off} \quad (1)$$

式中: $L_D, L_S$  分别为 GaN 功率器件源极、漏极等效电感; $R_D, R_S, R_C$  分别为 GaN 功率器件的源极、漏极、门级等效电阻; $L_{BUS}, R_{BUS}$  为直流母线中电感和电阻;系数  $K_s$  一般取 1~1.5; $ESL$  为直流母线等效电容等效电感; $ESR$  为直流母线等效电感。

通过查阅 GS66508B 的 datasheet 可知, GS66508B 的  $R_C$  为 1.1  $\Omega$ ,  $R_{DS}$  为 50 m $\Omega$ ,  $V_{GS}$  为 1.7 V,  $L_{DS}$  为 3 nH,  $L_G$  为 3 nH,  $ESL$  取值为 10~40 nH,  $ESR$  取值为 10~20 nH。

在实际应用过程中, GaN 功率器件可能会出现过电压故障,在器件关断瞬间,产生过高的  $di/dt$  作用在寄生电感,  $U_{DS}$  升高,超过 GaN 功率开关管关断时的安全电压,器件失效,不能使用。因此在驱动电路设计的过程中考虑过电压保护措施。

在实际应用过程中, GaN 功率开关管可能会出现电流故障,当开关管在导通时,发生负载过电流,开关管的漏极-源极会从一个饱和电压值上升至母线电压,漏极电压在上升的过程中,会产生强烈的  $dv/dt$ ,变化较快的  $dv/dt$  会给 GaN 功率器件的米勒电容充电,进而耦合功率器件门级,功率器件门级电压进一步上升,所以功率器件的工作电流  $I_{DS}$  会进一步上升,器件发热严重<sup>[11]</sup>。如果不采取措施解除其过电流现象,会缩短功率器件寿命,因此需要设计过电流保护电路。在本次的设计过程中,采用短路电流分级保护措施,当

检测到电流过额定电流2倍以内,采取快速关断模式;当检测到电流过额定电流2倍以上采取缓关断保护措施。

### 1.3 驱动设计要求

综上所述,在设计中注意以下要点:1)选择独立的拉灌输出的驱动电路来控制 GaN 器件开通与关断。2)选择合适的开通电阻与关断电阻,通过设计合理的开通与关断阻尼,来改变器件开通与关断的驱动电流的大小,进而减少开关振荡与开关损耗。3)通过优化功率回路布局,减少寄生电感的产生,门级布线电容要小,避免造成器件振荡或者误导通。4)设计中应考虑器件在开通过程中可能过压、过流现象,利用有源钳位、缓关断等方式保护异常情况下的器件。

## 2 GaN 驱动电路与保护设计

本次具体设计过程,采用 GaN systems 的 GS66508B,650 V 增强型 GaN 功率器件。其功率器件具体的技术参数为:漏源电压  $U_{DS}$  为 650 V,栅极电压  $U_{GS}$  为 10 V/+7 V,推荐驱动电压  $U_{GS}$  为 6 V,阈值电压  $U_{GS(th)}$  为 1.7 V,工作电流  $I_{DS}$  为 30 A ( $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 25 A ( $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 开关频率为 500 kHz,驱动电压 6 V。具有保护功能,防误通、过压和过流。

驱动电路如图3所示。其中,区域①为过电流分级保护设计;区域②为RC吸收电路减缓振铃设计;区域③为有源钳位过电压保护设计;区域④为减少寄生振荡设计;区域⑤为过电流直接关断设计;区域⑥为过电流缓关断设计。

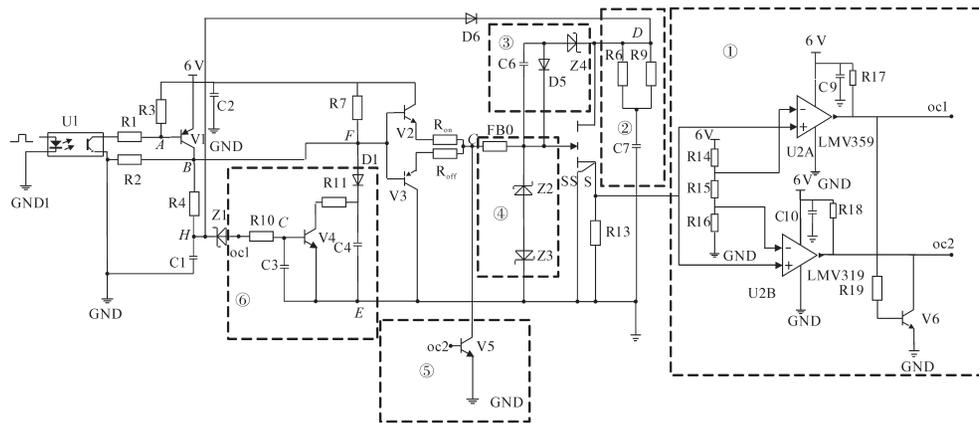


图3 驱动电路原理图

Fig.3 Schematic diagram of gate driver

### 2.1 器件正常导通与关断驱动回路设计与分析

当 GaN 器件正常开通时,PWM 3.3 V 信号输入时,U1 导通,A 点为低电位,V1,V2 导通,GaN 功率器件栅极由 V2 与  $R_{on}$  接通驱动电源 6 V,GaN 功率器件由关断变为开通。当其正常开通后,GaN 开关器件  $U_{DS}$  降为 1.7 V,在 V1 导通的同时,电源通过 V1 与 R4 给电容 C1 充电,H 点电位升高,通过选取合适的 C1 与 R4,在开关管器件导通之前,Z1 未被击穿。所以二极管 D6 正常导通,V4,V5 截止,因此器件正常开通,不受影响。

当 GaN 器件正常关断时,PWM 0 V 信号输入时,U1 截止,A 点为高电位,V1,V2 由导通变为截止,V3 由截止变为导通,GaN 功率器件栅极电荷通过关断电阻  $R_{off}$ ,V3 释放,GaN 功率器件可靠性关断。

### 2.2 过电流保护电路设计与分析

当器件正常开通时,可能会出现以下过电流故障。当其  $I_{DS}$  急剧上升,在 GaN 开关器件的源

极通过串联检测电阻 R13 测两端的电压来测验电流的变化。在利用电阻检测电流时,在高压大电流情况下,会产生额外损耗。在 GaN 功率器件源极设计中,分离出两个源极,分别是 SS 极与 S 极,其两个极电流值之比为 3:1,将检测电阻放在 S 极间接测得  $I_{DS}$ ,可将额外的损耗降为直接检测损耗的 1/4。测得当  $30\text{ A} < I_{DS} < 60\text{ A}$  时,比较器 LMV359 输出端 oc2 输出高电平直接令 V5 导通,GaN 栅极电荷直接由 V5 全部释放,GaN 栅极电压实现了 GaN 功率器件的快速关断;当  $I_{DS} > 60\text{ A}$  时,比较器 LMV359 输出端 oc1 高电平通过 V6 将比较器 U2B 输出高电平拉低,令快速关断模式不做出反应。比较器 U2A 输出端通过 R10 与 V4 相接通,并令 V4 导通,C3 沿 V4 放电,E 点电位逐渐降低至正偏 D1 导通,F 点电位逐渐降低,直至 GaN 功率器件缓慢关断。通过更改 R11 与 C4 的参数值可以调节器件关断的速度,实现其缓慢关断。

### 2.3 过电压保护电路设计与分析

当变换器出现过电压故障时,在工作过程中,遇到换流情况,由于电路中寄生电感的存在,较高的电流变化会产生电压过充,进而加在直流母线  $U_{DS}$  上,当  $U_{DS}$  超过 TVS 电压后,TVS 管被击穿,电流经过 TVS 管一部分给电容充电,另一部分通过二极管 D5 给晶体管寄生电容  $C_{GS}$  充电,晶体管栅极电位抬高,  $I_{DS}$  下降缓慢,直至过压结束。

### 2.4 GaN 防误通与减缓振铃设计

针对 GaN 功率器件振荡与误导通问题,在本次设计电路中具体采取的解决办法如下。

在栅极电路中加入磁珠 FBO,利用铁氧体磁珠在电路中起着阻高频通低频的作用,进而来吸收 GaN 功率器件驱动回路中在高频状态过程中产生的振荡,令驱动更加稳定可靠。

在栅源级之间设计加入两个齐纳二极管,其作用是栅极保护作用,根据 GaN 功率特性栅极耐压  $U_{GS}$  为  $10\text{ V}/\pm 7\text{ V}$ ,通过两个齐纳二极管加入,当栅源电压大于  $7\text{ V}$  时,令栅源之间电压被钳位在  $5.6\text{ V}$ ,保护器件不被击穿。

采用独立的开通与关断输出的驱动电路来控制器件的开启与关断,能够形成独立的开通与关断回路,合适的开通或者关断电阻值可以有效地避免开通与关断回路 RLC 谐振,从而减小开通与关断期间振铃情况。

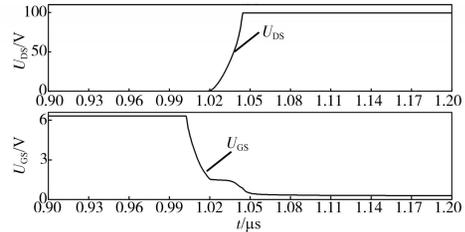
在 GaN 功率器件漏源两端设置阻容吸收电路,进一步防止尖峰、振铃、噪声造成功率管击穿。

## 3 实验验证与仿真分析

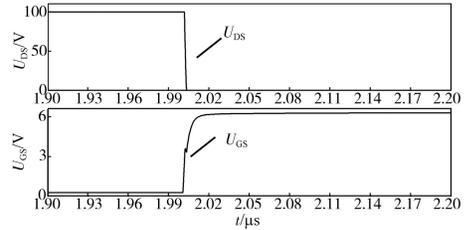
### 3.1 仿真分析

在进行实验平台搭建之前,利用仿真软件 LTspice 对 GaN 功率器件特性进行仿真分析。GaN 功率器件选用 GaN system 公司的 GS66508B-L3V4P1 spice 库模型。其中驱动电压为  $6\text{ V}$ ,开关频率为  $500\text{ kHz}$ 。对 GaN 功率开关器件正常导通、关断、减缓振铃、短路过电流分级保护进行仿真,其器件波形图如图 4~图 6 所示。

图 4 为 GaN 功率器件驱动波形,可以看出驱动电压约为  $6\text{ V}$  左右,器件可快速导通与关断器件未出现误通现象。如图 5a 所示,GaN 功率器件在关断过程中  $U_{DS}$  会产生关断振铃,波动电压为  $10\text{ V}$  左右,通过在功率器件的源极与漏极加 RC 吸收电路。从图 5b 可以看出关断振铃基本被减缓。通过对功率器件过电流短路仿真测试,当功



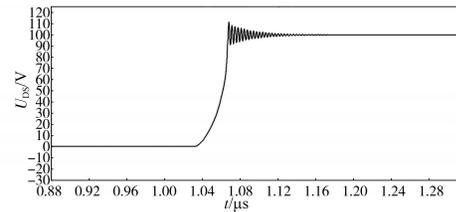
(a)GaN功率器件关断波形



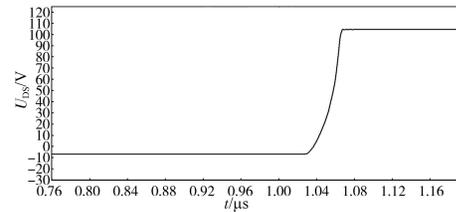
(b)GaN功率器件开通波形

图4 GaN功率器件驱动仿真波形图

Fig.4 Simulation waveforms of gate driver



(a)未加吸收电路前



(b)加吸收电路后

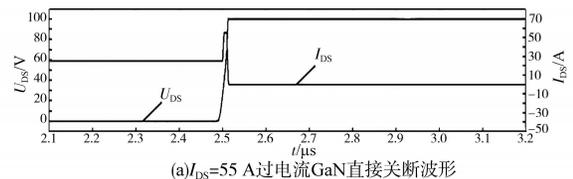
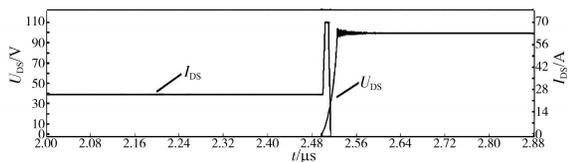
图5 减缓  $U_{DS}$  振铃仿真波形Fig.5 Simulation waveforms of slow down  $U_{DS}$  ringing(a) $I_{DS}=55\text{ A}$ 过电流GaN直接关断波形(b) $I_{DS}=70\text{ A}$ 过电流GaN缓关断波形

图6 GaN过电流保护电流仿真波形

Fig.6 Simulation waveforms of GaN overcurrent protection current rate switch device in short circuit, when  $I_{DS}$  is within twice the rated current, from Fig.6a it can be seen that the device makes a quick turn-off within  $20\text{ ns}$ , when  $I_{DS}$  is above twice the rated current, the device makes a slow turn-off within  $80\text{ ns}$ .

### 3.2 实验验证

本文搭建了 Boost 实验平台,开关频率为  $500$

kHz,通过实验验证驱动电路设计的正确性。

图7为器件开关频率在500 kHz时,Boost电路中 GaN 功率开关管的驱动波形图。从图上可以看出,在实验条件下,GaN 功率开关器件的开通电压波形约为6 V左右,GaN 功率开关器件未出现误通的现象,其开通的时间为20 ns,其关断的时间为15 ns,实现了器件的快速通断,其由于寄生电感引起的尖峰与震荡为0.7 V,符合设计要求。

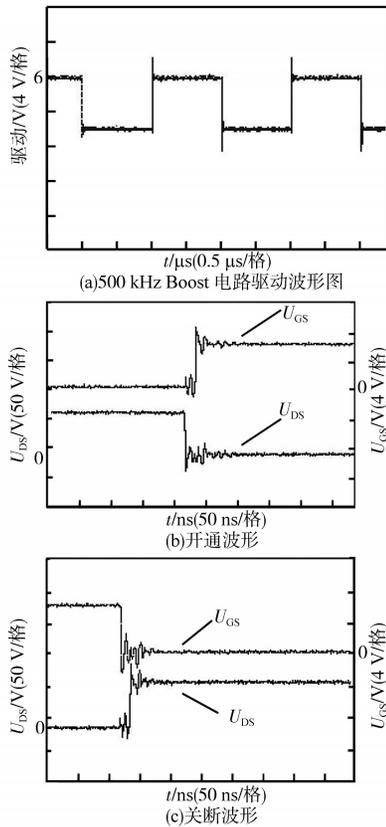


图7 Boost 变换器实验波形

Fig.7 Experimental waveforms of Boost convertor

## 4 结论

本文对 GaN 功率器件驱动特性进行了分析,根据其开通与关断回路分析其振铃与误导通现象,提出了一种 GaN 器件栅极驱动电路优化设计,解决 GaN 功率器件使用过程中误导通、振铃现象、过电压与过电流情况。通过仿真与实验的波形分析,验证设计的合理性与有效性。

### 参考文献

[1] 潘溯,胡黎,冯旭东,等. 600 V 耗尽型 GaN 功率器件栅极驱动方案设计[J]. 电源学报, 2019, 17(3): 57-63.  
Pan Su, Hu Li, Feng Xudong, et al. Design of gate drive scheme for 600 V depletion-mode GaN power devices[J]. Jour-

nal of Power Supply, 2019, 17(3): 57-63.  
[2] Zhao Xiaonan, Yeh C S, Zhang Lanhua, et al. A 2 MHz wide-input hybrid resonant converter with ultra-compact planar coupled inductor for low power integrated on-chip applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(1): 376-387.  
[3] 李凯. 高稳定性 IGBT 驱动器保护电路[J]. 电气传动, 2020, 50(6): 98-102.  
Li Kai. High stability IGBT driver protection circuit[J]. Electric Drive, 2020, 50(6): 98-102.  
[4] 王品贺,杨明,商书宇,等. 基于 GaN 功率器件伺服驱动系统的设计与研究[J]. 电气传动, 2019, 49(10): 65-69.  
Wang Pinhe, Yang Ming, Shang Shuyu, et al. Design and research of servo drive system based on GaN power devices[J]. Electric Drive, 2019, 49(10): 65-69.  
[5] 陈哲,崔龙然,刘春强,等. 抑制 GaN 变换器振铃的高频驱动电路设计[J]. 电力电子技术, 2019, 53(6): 125-127,133.  
Chen Zhe, Cui Longran, Liu Chunqiang, et al. Research on the voltage oscillation suppression design of high frequency drive circuit of GaN power converter [J]. Power Electronics, 2019, 53(6): 125-127,133.  
[6] 黄波. Cascode GaN 晶体管与 GaN 二极管应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.  
Huang Bo. Application research on cascode GaN transistor and GaN diode[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.  
[7] 王旭东,朱义诚,赵争鸣,等. 驱动回路参数对碳化硅 MOSFET 开关瞬态过程的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 32(13): 23-30.  
Wang Xudong, Zhu Yicheng, Zhao Zhengming, et al. Impact of gate loop parameters on the switching behavior of SiC MOSFETs. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(13): 23-30.  
[8] Zhao Xiaonan, Yeh C S, Zhang Lanhua, et al. A 2MHz wide-input hybrid resonant converter with ultra-compact planar coupled inductor for low power integrated on-chip applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(1): 376-387.  
[9] Zhang Yajing, Wang Jiuhue, Li Hong, et al. The drive circuit design for paralleling operation of enhancement GaN HEMT in an isolated DC-DC converter[C]/2018 IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA). Xi'an, China, 2018: 30-35.  
[10] Wang Kangping, Yang Xu, Wang Laili, et al. Instability analysis and oscillation suppression of enhancement-mode GaN devices in half-bridge circuits[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1585-1596.  
[11] 吴伟亮,简优宗,于彬. 一种数字 IGBT 驱动器的设计[J]. 电气传动, 2019, 49(10): 87-90.  
Wu Weiliang, Jian Youzong, Yu Bin. Design of a digital IGBT driver [J]. Electric Drive, 2019, 49(10): 87-90.

收稿日期:2020-08-31

修改稿日期:2020-10-11