

Cascode 型 GaN HEMT 输出伏安特性及其在单相逆变器中的应用研究

李艳 张雅静 黄波 郑琼林 郭希铮
(北京交通大学电气工程学院电力电子研究所 北京 100044)

摘要 近年来随着氮化镓器件制造工艺的迅速发展,氮化镓高电子迁移率晶体管(GaN HEMT)已经开始应用在电力电子领域。高压共源共栅(Cascode)GaN HEMT的出现使得GaN器件可以在高压场合进行应用。本文首先研究了耗尽型GaN HEMT及Cascode GaN HEMT全范围输出伏安特性及其特点。结合Si MOSFET和耗尽型GaN HEMT的特性,本文重点研究了Cascode GaN HEMT的工作模式及其条件。最后,给出了500W基于600V Cascode GaN HEMT单相全桥逆变器的实验验证。实验结果和仿真验证证明了理论分析的正确性。

关键词: 宽禁带半导体器件 GaN HEMT 共源共栅结构 输出伏安特性
中图分类号: TM464

Research on Output Volt-ampere Characteristics of Cascode GaN HEMT and Its Application in Single-phase Inverter

Li Yan Zhang Yajing Trillion Q. Zheng Huang Bo Guo Xizheng

(Institute of Power Electronics of Beijing Jiaotong University Beijing 100044 China)

Abstract: In recent years with the rapid development of the manufacturing process of GaN devices, Gallium Nitride high electron mobility transistors (GaN HEMT) has begun to be applied in the field of power electronics. The appearance of the Cascode GaN HEMT makes it possible to apply GaN device in high voltage application. The output volt-ampere characteristics of the depletion mode GaN HEMT and Cascode GaN HEMT are investigated in detail, which is important for the operation mode of the Cascode GaN HEMT. This paper presents the steady-state operation mode for high voltage gallium nitride (GaN) high-electron-mobility transistors (HEMT) in a Cascode structure. The steady-state analysis is verified by a 500W single phase DC/AC inverter. Theoretical analysis is verified by simulation and experiment results.

Keywords: Wide Bandgap Semiconductor Device; GaN HEMT; Cascode; Output volt-ampere characteristics

1 引言

以SiC和GaN为代表宽禁带半导体器件被誉为第三代半导体器件。GaN器件目前已开始应用于电力电子领域。其优异的特性引起了国内外学者的关注^[1-4]。

氮化镓高电子迁移率晶体管(GaN HEMT)可以分为增强型和耗尽型两种。目前单体增强型GaN

HEMT器件的额定电压最大能达到250V。对于单体增强型GaN HEMT,当其驱动电压达到阈值电压 $V_{TH}=1.5V$ 时,器件就会导通,器件完全导通的栅极电压为4.5V~5.5V,由于其最大栅源电压 V_{gs} 为6V,因此增强型GaN器件对驱动设计要求较高^[5-8]。

单体耗尽型GaN HEMT的驱动电压范围为-30~2V,器件完全导通栅极电压为-5V,驱动电压范围较宽。然而,由于耗尽型GaN HEMT为常通型器件,使用时需要负压关断,有短路直通的潜在危险^[9-10]。

北京市科技计划课题资助项目(Z141100003114011)。

收稿日期 2014-09-10

高压 GaN HEMT 可以通过两种途径制备,既可以通过单体 GaN HEMT,也可以通过共源共栅结构(Cascode 结构)形成。目前市场上高压 GaN HEMT 采用 Cascode 结构制造。由于 Cascode GaN HEMT 通态和开关损耗极低,且其体二极管与 Si MOSFET 相比具备更优的反向恢复 (Q_{rr}) 特性,因而能显著改善电源系统的效率。目前国内外在单体 GaN HEMT 器件应用研究取得了一系列成果^[11-14],而 Cascode 结构 GaN HEMT 的研究及应用几乎还是空白。目前高压 Cascode GaN HEMT 的第三象限工作情况的分析及工作特性研究在文献和器件产品手册中均没有研究和说明。Cascode GaN HEMT 的第三象限工作情况既不同于 Si MOSFET 也不同于增强型 GaN HEMT。Cascode GaN HEMT 器件的稳态工作特性及其应用是目前需要进一步研究的重要领域。

本文首先给出了耗尽型 GaN HEMT 和 Si MOSFET 的输出伏安特性。以此为基础本文重点研究了 Cascode GaN HEMT 的输出伏安特性及其工作状态。Cascode GaN HEMT 通态和开关损耗极低,且具备比 Si MOSFET 更低的反向恢复 (Q_{rr}) 特性,可提高变换器的效率。Cascode GaN HEMT 适合应用于单相逆变器电路。本文搭建了 500W Cascode GaN HEMT 单相逆变器平台,实验结果验证了理论分析的正确性。

2 Cascode GaN HEMT 器件的结构及其输出伏安特性

2.1 Cascode GaN HEMT 器件结构

耗尽型 GaN HEMT 属于横向器件,其结构示意图如图 1 所示。在该结构中,GaN 器件以 Si 半导体材料做衬底,在 Si 衬底的基础上生长出高阻性 GaN 晶体层。在 GaN 层与 Si 衬底层之间加入氮化铝绝缘层用于隔离器件和衬底。GaN 层与栅极(G)、源极(S)和漏极(D)之间是 AlGaIn 层,在 AlGaIn 层与 GaN 层之间可产生具有高电子迁移率、低阻特性的二维电子气(2DEG)。

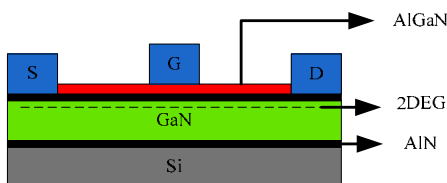


图 1 耗尽型 GaN HEMT 器件结构

Fig.1 Structure of depletion mode GaN HEMT

该器件为电压控制型器件,当栅极和源极之间的负向电压大于阈值电压时,栅极被激活,二维电子气(2DEG)将会形成,晶体管导通;当栅极和源极之间的电压小于阈值电压时,晶体管关断。

由于耗尽型 GaN HEMT 为常通型器件,为了方便器件应用通常采用 Cascode 结构将低压 Si MOSFET 与耗尽型 GaN HEMT 串联使用以驱动高压的 GaN HEMT,如图 2 所示^[15]。因为 GaN HEMT 的栅极与 Si MOSFET 的源极相连,所以 Si MOSFET 的 V_{ds_Si} 等于 GaN HEMT 的 $-V_{gs_GaN}$,从而提供必要的负偏压以实现 Cascode GaN 器件的关断。每个半导体器件都能够工作在第三象限。然而,Cascode GaN HEMT 的工作机理不同于 Si MOSFET 和单体 GaN HEMT,其工作机理将在后文进行说明。

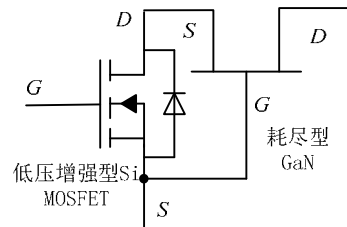


图 2 高压 Cascode GaN HEMT 结构

Fig.2 Configuration of high voltage Cascode GaN HEMT
Transphorm 公司高压 Cascode GaN HEMT TPH3006,该器件最大耐压 600V,最大通态电流 17A。TPH3006 由 IRF8707 与耗尽型高压 GaN HEMT 串联组成。Cascode GaN HEMT TPH3006、耗尽型高压 GaN HEMT 及 IRF8707 的器件参数如表 1 所示^[16-17]。

表 1 Cascode GaN HEMT 中各器件参数列表

	TPH3006PS	耗尽型 GaN HEMT	IRF8707
V_{ds}/V	600	600	30
$I_{D25^\circ C}/A$	17	17	11
V_{gs}/V	± 18	-40~+2	± 20
V_{TH}/V	1.8	-20	1.8
$R_{ds}/m\Omega$	150(典型值)	140(典型值)	9.3(典型值)
	180(最大值)	170(最大值)	11.9(最大值)
	$(V_{GS}=8V, I_D=11A, T_J=25^\circ C)$		

2.2 耗尽型 GaN HEMT 输出伏安特性

从图 1 中可以看出 GaN HEMT 是横向结构器件,GaN HEMT 的栅极下不存在与源极连接的 P 型寄生双极区域。因此,不同于 Si MOSFET, GaN HEMT 没有寄生体二极管。这种结构使得 GaN

HEMT 具有对称的传导特性,即 GaN HEMT 既可以被正向栅极至源极电压 (V_{gs_GaN}) 驱动也可以被正向栅极至漏极电压 (V_{gd_GaN}) 驱动。

Cascode GaN HEMT TPH3006 中耗尽型 GaN HEMT 的输出伏安特性如图 3 所示。Cascode GaN HEMT 阈值电压 $V_{TH_GaN} = -20V$ 。

从图 3 可以看出,第一象限与第三象限不同。为分析该工作机制,图 4 中给出了 GaN HEMT 的等效模型。由克希霍夫电压定律(KVL)可知:

$$V_{gd_GaN} = V_{gs_GaN} - V_{ds_GaN} \quad (1)$$

因此,反向导通时需要:

$$V_{gd_GaN} = V_{gs_GaN} - V_{ds_GaN} > V_{TH_GaN} \quad (2)$$

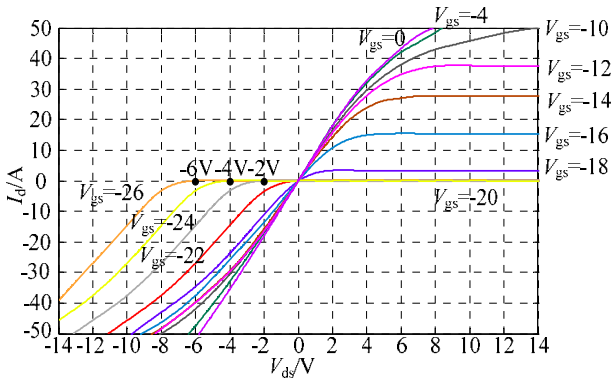


图 3 耗尽型 GaN HEMT 输出伏安特性曲线

Fig.3 Output volt-ampere characteristics of the depletion mode GaN HEMT

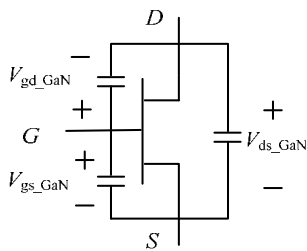


图 4 GaN HEMT 的等效模型

Fig.4 Equivalent model of GaN HEMT

耗尽型 GaN HEMT 是常通型器件,其阈值电压 $V_{TH_GaN} < 0$,其工作状态可分为以下四种情况:

1) 正向阻断($V_{ds_GaN} > 0, V_{gs_GaN} < V_{TH_GaN}$)

当耗尽型 GaN HEMT 的驱动电压 V_{gs_GaN} 小于其阈值电压 V_{TH_GaN} 且其漏源电压 V_{ds_GaN} 大于零时,耗尽型 GaN HEMT 处于正向阻断状态。

2) 正向导通($V_{ds_GaN} > 0, V_{gs_GaN} \geq V_{TH_GaN}$)

当耗尽型 GaN HEMT 的漏源电压 V_{ds_GaN} 大于

零,且驱动电压 $V_{gs_GaN} \geq V_{TH_GaN}$ 时,耗尽型 GaN HEMT 导通,电流流过耗尽型 GaN HEMT 的沟道。此时,耗尽型 GaN HEMT 处于正向导通状态。

1) 反向导通($V_{ds_GaN} < 0, V_{gs_GaN} - V_{ds_GaN} = V_{gd_GaN} \geq V_{TH_GaN}$)

GaN HEMT 具有对称的传导特性,当耗尽型 GaN HEMT 漏源电压 V_{ds_GaN} 小于零的情况下,若 $V_{gs_GaN} - V_{ds_GaN} = V_{gd_GaN} \geq V_{TH_GaN}$,耗尽型 GaN HEMT 处于反向导通状态。

2) 反向关断($V_{ds_GaN} < 0, V_{gs_GaN} - V_{ds_GaN} = V_{gd_GaN} < V_{TH_GaN}$)

当耗尽型 GaN HEMT 承受反向压降 $V_{ds_GaN} < 0$ 时,若 $V_{gs_GaN} - V_{ds_GaN} = V_{gd_GaN} < V_{TH_GaN}$,则耗尽型 GaN HEMT 处于反向关断状态。

2.3 Si MOSFET 输出伏安特性

功率 Si MOSFET 实际上是一个双向导电器件,其完整的输出伏安特性应包括第一象限和第三象限,第一象限表示 Si MOSFET 的正向导电特性,第三象限表示 Si MOSFET 的反向导电特性;对于 N 沟道 Si MOSFET 其特性曲线如图 5 所示。

当给 Si MOSFET 施加正向漏源电压 V_{ds} 且门极驱动电压 V_{gs} 大于其阈值电压 V_{TH_Si} 时,Si MOSFET 正向导通。此时传导电流大小取决于该状态下 Si MOSFET 的导通电阻。当驱动电压 V_{gs} 足够大时,输出伏安特性曲线呈现线性状态,此时 Si MOSFET 完全导通。

在第三象限中,Si MOSFET 开关管反向导通。在导通电流较小时,Si MOSFET 沟道压降 V_{sd} 压降小于体二极管正向压降,电流完全流过 Si MOSFET 沟道,其特性与第一象限对称;当 V_{sd} 压降大于体二极管正向压降时,Si MOSFET 体二极管导通,输出伏安特性表现为二极管特性。

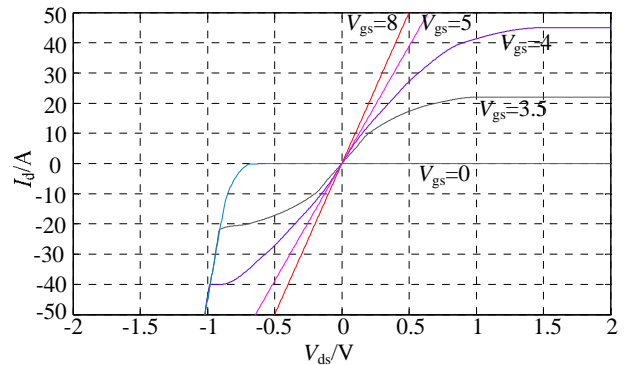


图 5 N 沟道 Si MOSFET (IRF8707) 输出伏安特性曲线

Fig.5 Output volt-ampere characteristics of the Si MOSFET IRF8707

2.4 Cascode GaN HEMT 输出伏安特性

如上所述，Cascode GaNHEMT 中低压 Si MOSFET 与高压耗尽型 GaN HEMT 串联使用，以驱动耗尽型的 GaN HEMT。Cascode GaN HEMT 等效电路如图 6 所示。

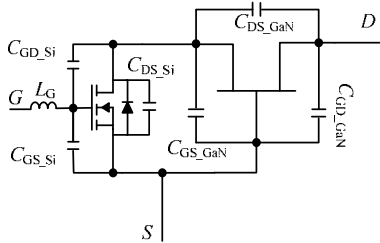


图 6 Cascode GaN HEMT 的等效模型

Fig.6 Equivalent model of the Cascode GaN HEMT

当 Cascode GaN HEMT 驱动电压 $V_{gs} > V_{TH_Si}$ 后，Cascode GaN HEMT 中 Si MOSFET 开始导通。随之，Si MOSFET 的等效电容 C_{GD_Si} 、 C_{DS_Si} 开始放电。由于耗尽型 GaN HEMT 等效电容 C_{GS_GaN} 与 C_{DS_Si} 并联，因此 C_{GS_GaN} 也随之放电。当 $V_{gs_GaN} = V_{TH_GaN}$ 时，Cascode GaN HEMT 中 GaN HEMT 开始导通，GaN HEMT 电容 C_{DS_GaN} 和 C_{GD_GaN} 放电， V_{DS_GaN} 电压下降。

600V Cascode GaN HEMT TPH3006 器件输出伏安特性如图 7 所示。

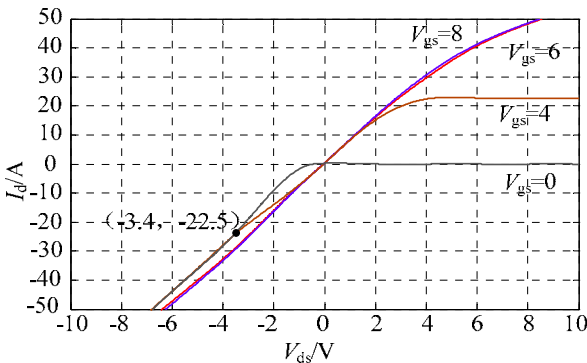


图 7 Cascode GaN HEMT 输出伏安特性曲线

Fig.7 Output volt-ampere characteristics of the Cascode GaN HEMT

3 Cascode GaN HEMT 工作模式

Cascode GaN HEMT 是常闭器件，通过控制 Si MOSFET 的开关状态间接控制耗尽型 GaN HEMT。其工作模式不同于 Si MOSFET 和耗尽型 GaN HEMT，Cascode GaN HEMT 的工作状态除受驱动电压 V_{gs} 、漏源电压 V_{ds} 的控制外，还与 Si MOSFET 和耗尽型 GaN HEMT 的工作情况有关。Cascode GaN HEMT 的稳态工作模式分析如下：

3.1 正向阻断模式 ($V_{gs}=0, V_{ds}>0$)

1) Si MOSFET 关断，GaN HEMT 导通 ($V_{gs}=0, 0 < V_{ds} < -V_{TH_GaN}$)

因驱动电压 $V_{gs}=0$ ，此时 Si MOSFET 处于关断状态，此时没有电流流过开关管 $I_d=0$ 。由于 $-V_{gs_GaN} = V_{ds_Si} < V_{ds} < -V_{TH_GaN}$ ，Cascode GaN HEMT 中耗尽型 GaN HEMT 处于开通状态。开关管中 Si MOSFET 承受所有电压等于 Cascode GaN HEMT 的漏源电压，即 $V_{ds_Si} = V_{ds}$ 。

2) Si MOSFET 和 GaN HEMT 都关断 ($V_{gs}=0, -V_{TH_GaN} < V_{ds}$)

当 Cascode GaN HEMT 的驱动电压 $V_{gs}=0$ ，Cascode GaN HEMT 中 Si MOSFET 处于关断状态。随着 Cascode GaN HEMT 漏源电压 V_{ds} 的增大，当 $V_{ds} > -V_{TH_GaN}$ 时，耗尽型 GaN HEMT 驱动电压 V_{gs_GaN} 小于耗尽型 GaN HEMT 的阈值电压 V_{TH_GaN} 。此时，耗尽型 GaN HEMT 处于关断状态。Cascode GaN HEMT 中 Si MOSFET 与耗尽型 GaN HEMT 分压共同承受漏源电压 V_{ds} 。

3.2 正向导通模式 ($V_{gs} > V_{TH_Si}, V_{ds} > 0$)

当 Cascode GaN HEMT 驱动电压 V_{gs} 大于 Si MOSFET 的阈值电压 V_{TH_Si} 时，Si MOSFET 处于导通状态如图 8 所示。因 $-V_{ds_Si} = V_{gs_GaN} > V_{TH_GaN}$ ，耗尽型 GaN HEMT 也处于导通状态。此时 Cascode GaN HEMT 的漏源电压为：

$$V_{ds} = I_d (R_{ds_Si} + R_{ds_GaN}) \quad (3)$$

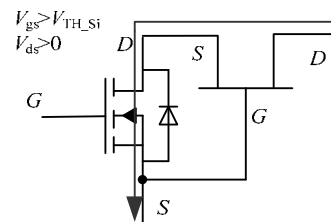


图 8 Cascode GaN HEMT 正向导通模式

Fig.8 Forward conduction of Cascode GaN HEMT

3.3 反向导通模式 ($V_{ds} < 0$)

1) Si MOSFET 体二极管导通 ($V_{gs}=0, V_{ds} < 0$)

当 Cascode GaN HEMT 的驱动电压 $V_{gs}=0$ ，Si MOSFET 沟道处于关断状态。由于 Cascode GaN HEMT 的漏源电压 $V_{ds} < 0$ ，Si MOSFET 体二极管导通。耗尽型 GaN HEMT 的驱动电压 V_{gs_GaN} 等于二极管的导通压降 V_F ，即 $V_{gs_GaN} = V_F > V_{TH_GaN}$ 。电流 I_d 流过 Si MOSFET 体二极管及耗尽型 GaN HEMT 沟道。此时 Cascode GaN HEMT 的漏源电压为：

$$V_{sd} = V_{sd_Si} + I_F g R_{ds_GaN} \quad (4)$$

2) Si MOSFET 沟道导通 ($V_{gs} > V_{TH_Si}$, $V_{ds} < 0$, $V_{ds_Si} > -V_F$)

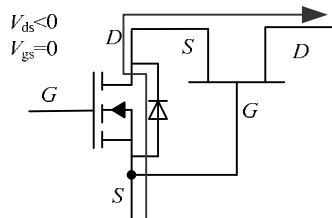
为了降低 GaN HEMT 反向导通压降较多的问题，可以通过给 Cascode GaN HEMT 施加一个较大的驱动电压 $V_{gs} > V_{TH_Si}$ ，Si MOSFET 处于饱和区时，Si MOSFET 沟道完全导通，其沟道阻抗非常小。Si MOSFET 的沟道压降 $V_{ds_Si} > -V_F$ ，电流 I_d 全部流经 Si MOSFET 沟道。此时 Cascode GaN HEMT 的漏源电压为：

$$V_{ds} = I_F (R_{ds_Si} + R_{ds_GaN}) \quad (5)$$

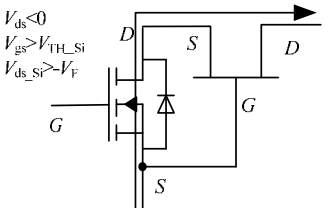
3) Si MOSFET 沟道和体二极管同时导通 ($V_{gs} > V_{TH_Si}$, $V_{ds} < 0$, $V_{ds_Si} \leq -V_F < 0$)

当 Cascode GaN HEMT 驱动电压 $V_{gs} > V_{TH_Si}$ 且驱动电压较小，Si MOSFET 处于放大区时，Si MOSFET 沟道电阻由驱动电压决定，存在 $V_{ds_Si} \leq -V_F < 0$ 的情况。当 $V_{ds_Si} \leq -V_F < 0$ 时，MOSFET 沟道和具体二极管同时导通并分流，Si MOSFET 的漏源电压被钳位在体二极管导通压降。此时 Cascode GaN HEMT 的漏源电压 V_{ds} 为：

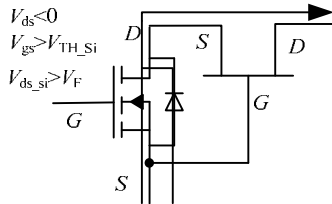
$$V_{ds} = I_F R_{ds_GaN} + V_F \quad (6)$$



(a) Si MOSFET 体二极管导通



(b) Si MOSFET 沟道导通



(c) Si MOSFET 沟道和体二极管同时导通

图 9 Cascode GaN HEMT 反向导通模式

Fig.9 Reverse conduction of the Cascode GaN HEMT

3.4 反向恢复模式 ($V_{gs}=0, V_{ds} \geq 0, I_{ds} < 0$)

GaN HEMT 器件导通时没有少数载流子，因此不存在反向恢复。当 Cascode GaN HEMT 反向关断时，只存在 Si MOSFET 体二极管的反向恢复过程。当 Si MOSFET 压降 $V_{ds_Si} \geq -V_{TH_GaN}$ 时，Cascode GaN HEMT 完全关断。

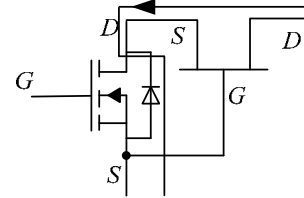


图 10 Cascode GaN HEMT 反向恢复模式

Fig.10 Reverse recovery of the Cascode GaN HEMT

4 基于 Cascode GaN HEMT 单相逆变器电路拓扑及仿真验证

鉴于单相全桥逆变器中开关管工作状态可以较为全面的体现 Cascode GaN HEMT 的工作状态。本文采用单相全桥逆变器电路进行仿真和实验验证。

4.1 基于 Cascode GaN HEMT 单相逆变器电路拓扑

基于 Cascode GaN HEMT 单相全桥逆变电路拓扑如图 11 所示，由开关管 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 组成。四个开关管组成两个半桥，桥臂的中点分别经过滤波网络与电网连接， C_{DC} 为直流母线支撑电容。

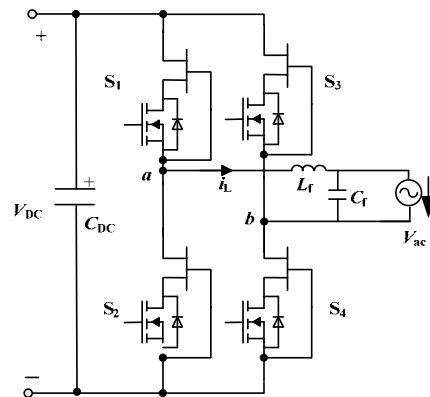


图 11 基于 Cascode GaN HEMT 单相全桥逆变器拓扑

Fig.11 Single phase inverter diagram based on Cascode GaN HEMT

单相全桥逆变电路采用单极性倍频调制方式。单极性倍频调制由两个相位相反的正弦波调制后得到的信号分别控制。其包含两个基准波 u_{s1} 和 u_{s2} ，且有 $u_{s1} = -u_{s2}$ ， u_{s1} 与载波 u_c 交截产生 u_{g1} 、 u_{g2} 信号； u_{s2} 与载波 u_c 交截产生 u_{g3} 、 u_{g4} 信号，如图 12 所示。

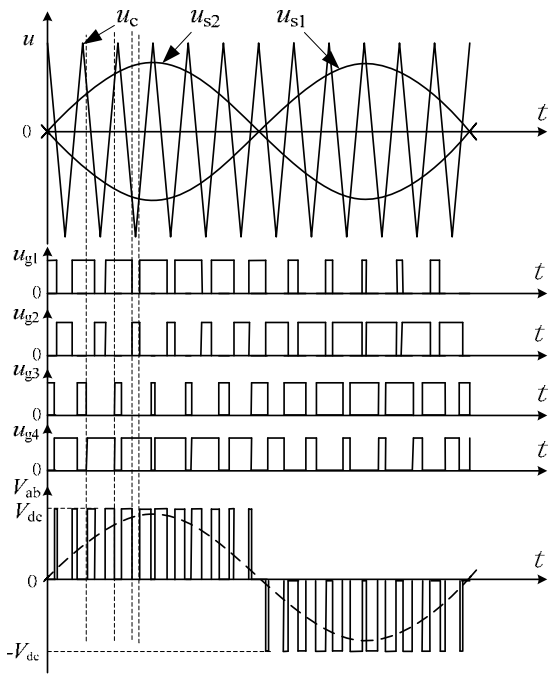


图 12 单相逆变器关键工作波形

Fig.12 Key waveforms of the single phase inverter

4.2 基于 Cascode GaN HEMT 单相逆变器电路仿真验证

使用 LTSpice 仿真软件利用 TPH3006 GaN HEMT 仿真模型对单相逆变器电路进行仿真验证。仿真条件为输入电压 $V_{dc}=380V$, 开关频率 $f_s=20kHz$, 并网电压 $V_{ac}=220V$, 输出功率 $P_o=500W$ 。

开关管的驱动信号 V_{gs} 、漏源电压 V_{ds} 及电感电流 I_L 波形如图 13 所示。依据仿真结果, 对单相逆变器中 Cascode GaN HEMT 的工作情况进行简要分析说明。

t_1-t_2 区间内开关管 S_1 、 S_4 处于正向导通状态, S_2 、 S_3 处于正向阻断状态, 电感电流 I_L 上升; t_2-t_3 区间内开关管 S_1 处于正向导通状态、 S_3 处于二极管反向续流状态、 S_2 、 S_4 处于正向阻断状态, 电感电流 I_L 下降。 t_3-t_4 区间内 S_1 处于正向导通状态、 S_3 处于沟道反向续流状态、 S_2 、 S_4 处于正向阻断状态, 电感电流 I_L 下降。 t_4-t_5 区间内 S_1 处于正向导通状态、 S_3 处于二极管反向续流状态、 S_2 、 S_4 处于正向阻断状态, 电感电流 I_L 下降。 t_5-t_6 区间与 t_1-t_2 区间相同。 t_6-t_7 区间开关管 S_4 处于正向导通状态、 S_2 处于二极管反向续流状态、 S_1 、 S_3 处于正向阻断状态, 电感电流 I_L 下降。 t_7-t_8 区间开关管 S_2 处于反向沟道导通状态, S_4 处于正向导通状态, S_1 、 S_3 处于正向阻断状态, 电感电流 I_L 下降。 t_8-t_9 与 t_6-t_7 区间相同。所有开关管关断过程都存在反向恢复过程。

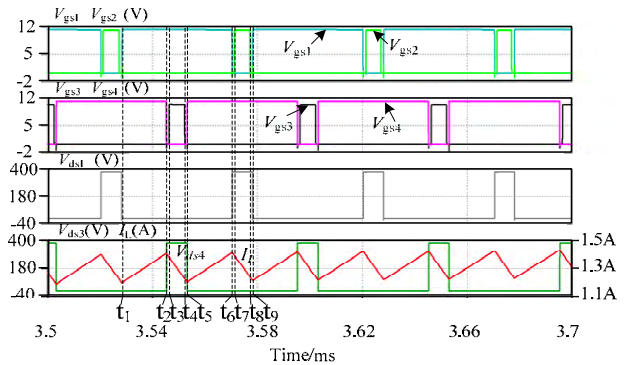


图 13 Cascode GaN HEMT 单相逆变器仿真结果

Fig.13 Simulation results of the Cascode GaN HEMT

based single phase inverter

4.3 基于 Cascode GaN HEMT 单相逆变器的损耗分析

Cascode GaN HEMT 的损耗主要包括: 开通损耗 P_{on} 、通态损耗 P_{con} 和关断损耗 P_{off} 以及死区时间内二极管续流带来的损耗。

根据功率开关管器件手册可以看出, 开关管的通态阻抗与结温有关, 因此要准确的分析开关管的损耗需要考虑开关管的通态电阻与温度的关系。

Cascode GaN HEMT 工频周期内的通态损耗为:

$$P_{con} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_{on}(\theta)^2 R_{ds_on}(T_J) D(\theta) d\theta \quad (7)$$

其中 $R_{ds_on}(T_J)$ 为 Cascode GaN HEMT 在工作结温为 T_J 的通态电阻, $D(\theta)$ 为单极性倍频控制下的占空比。

一般情况下, MOSFET 桥臂换流过程中, 其体二极管的反向恢复将影响另一只开关管的开通电流, 由于 Cascode GaN HEMT 具有较好的反向恢复特性, 其反向恢复对 Cascode GaN HEMT 的开通影响可以忽略不计, 可得到 Cascode GaN HEMT 的平均导通损耗:

$$P_{on} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{1}{2} f_s V_{DC} I_L(\theta) t_f d\theta \quad (8)$$

其中 t_f 为开关管开通上升时间

同理可以得到 Cascode GaN HEMT 关断损耗:

$$P_{on} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{1}{2} f_s V_{DC} I_L(\theta) t_r d\theta \quad (9)$$

其中 t_r 为开关管关断的下降时间。

Cascode GaN HEMT 开关一次, 在硬开关的过程中, 输出电容 C_{oss} 储存的能量将在开关管开通的过程中放电释放能量, 在高频工作下需要考虑结电容的损耗, 其损耗计算公式为:

$$P_{\text{coss}} = \frac{1}{2} f_s C_{\text{oss}} V_{\text{DC}}^2 \quad (10)$$

Cascode GaN HEMT 具有优良的反向恢复特性，体二极管的关断损耗较小，因此仅考虑其通态损耗和开通损耗。

与开关管的通态损耗类似，其体二极管通态压降为通态电流及结温有关的函数，可根据数据手册提供的曲线得到不同结温和通态电流下体二极管的通态压降。

其通态损耗为：

$$P_{\text{D_con}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_F(i_\theta, T_J) i_L(\theta) D_{\text{dead}} d\theta \quad (11)$$

其中 $V_F(i_\theta, T_J)$ 为不同时刻体二极管的正向导通压降， D_{dead} 为死区时间， $i_L(\theta)$ 为电感电流。

Cascode GaN HEMT 换流过程中，以 S_3 和 S_4 的换流过程为例。当开关管 S_4 关断时， $V_{\text{ds},S4}$ 电压上升，二极管反向压降下降。开关管 S_4 电流开始向 S_3 换流，此时 S_3 反向续流导通。经过开关管关断时间 t_{off} 后 S_3 和 S_4 换流结束。由于 GaN HEMT 极快的换流速度，正向恢复时间不用考虑，换流时间主要由开关管决定。GaN HEMT 体二极管的开通损耗为：

$$P_{\text{D_on}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{1}{2} f_s V_{\text{DC}} I_L(\theta) t_f d\theta \quad (12)$$

为分析 Cascode GaN HEMT 的效率优势，本文将其与 Si MOSFET 进行了理论对比分析。表 2 给出了 TPS3006 GaN HEMT 和 IPB60R190C6 的参数列表。

表 2 TPH3006 和 IPB60R190C6 器件参数列表

Tab.2 Parameters of TPH3006 and IPB60R190C6

参数	TPH3006	IPB60R190C6
V_{ds}/V	600	600
I_{D100}/A	12	12.8
R_{ds}/Ω	0.15	0.17
	$V_{\text{GS}}=8\text{V}, I_{\text{D}}=11\text{A}, T_J=25^\circ\text{C}$	$V_{\text{GS}}=10\text{V}, I_{\text{D}}=9.5\text{A}, T_J=25^\circ\text{C}$
C_{iss}/pF	740	1400
C_{oss}/pF	133	85
t_f/ns	3.1	11
t_{r}/ns	5.2	9
V_{SD}/V	1.6	0.9
	$V_{\text{GS}}=0\text{V}, I_{\text{F}}=5.5\text{A}, T_J=25^\circ\text{C}$	$V_{\text{GS}}=0\text{V}, I_{\text{F}}=9.5\text{A}, T_J=25^\circ\text{C}$
t_{rr}/ns	30	430
Q_{rr}/nC	54	6900

从表中可以看出，Cascode GaN HEMT 的开通关断速度较 Si MOSFET 快，理论上开通损耗是 Si

MOSFET 的 1/4，关断损耗是 Si MOSFET 的 1/2。此外，Cascode GaN HEMT 的反向恢复特性优于 Si MOSFET，二极管的反向恢复损耗可忽略。而 Si MOSFET 的反向恢复损耗将不容忽视。

图 14 给出了 TPS3006 GaN HEMT 和 Si MOSFET IPB60R190C6 的通态阻抗随结温变化的曲线图。从图中可以看出随着温度的升高，二者在相同温度下的导通阻抗基本一致。

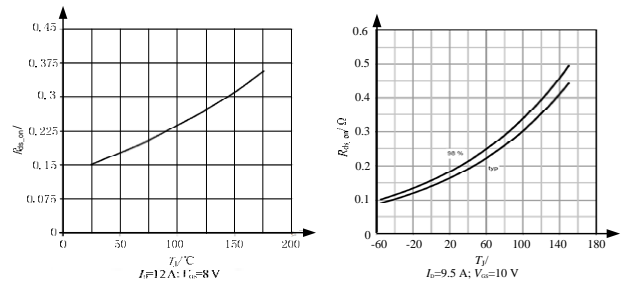


图 14 TPH3006 和 IPB60R190C6 导通电阻随结温变化图

Fig.14 R_{ds} vs T_J of TPH3006 and IPB60R190C6

根据以上参数，在额定功率 500W，结温 50 的情况下，依据公式(7)-(12)计算出 Cascode GaN HEMT 单管总损耗为 1.23W，效率约为 99%。在额定功率 500W 结温 50 的情况下，考虑 Si MOSFET 寄生二极管反向恢复损耗的情况下，Si MOSFET 单管损耗约为 4.2W，效率为 96.6%。

5 基于 Cascode GaN HEMT 单相逆变器实验验证

本文采用 Transphorm 公司高压 Cascode GaN HEMT TPH3006，该器件最大耐压 600V，25 时最大通态电流 17A，导通电阻 150mΩ。本文将 TPH3006 应用于单相全桥逆变器电路中进行实验验证。

逆变器输入电压 $V_{\text{dc}}=380\text{V}$ ，开关频率 $f_s=20\text{kHz}$ ，并网电压 $V_{\text{ac}}=220\text{V}$ ，输出功率 $P_o=500\text{W}$ 。基于 Cascode GaN HEMT TPH3006 的单相逆变器实验波形如图 15 所示。通道 1 为逆变器电感电流 I_L ，通道 2 为直流母线电压 V_{dc} ，通道 3 和通道 4 分别为开关管 S_1 、 S_4 的漏源电压 V_{ds} 。从图中可以看出，实验结果仿真结果一致，Cascode GaN HEMT 随着电路驱动的变化工作在不同的模式下，证明了理论和仿真分析的正确性。

鉴于 Cascode GaN HEMT 具有耐高压、开关损耗小及低反向恢复特性，可将其应用于效率要求较高的单相逆变器。本文分别将 TPH3006 和 Si MOSFET IPB60R190C6 (600V/190mΩ/20.2A) 应用

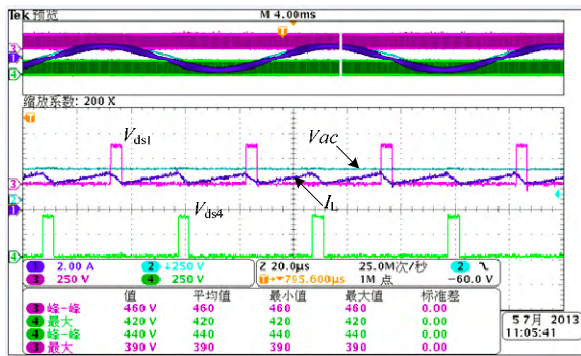
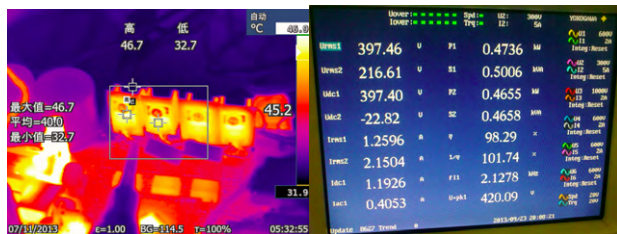


图 15 基于 Cascode GaN HEMT 单相逆变器实验波形

Fig.15 Experiment results of the Cascode GaN HEMT based on single phase inverter

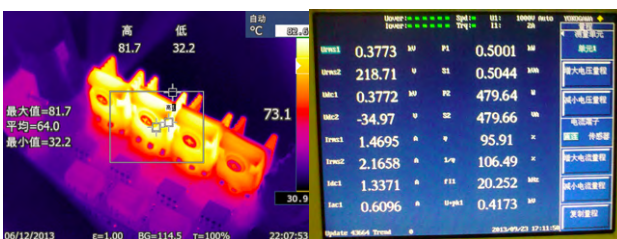
于单相逆变器中进行实验验证。逆变器输入电压 $V_{dc}=380V$,开关频率 $f_s=20kHz$,并网电压 $V_{ac}=220V$,输出功率 $P_o=500W$ 。图 16 给出了 TPH3006 和 Si MOSFET IPB60R190C6 单相逆变器温升及效率的对比实验结果。采用 TPH3006 的单相逆变器在最大效率为 98.29%。在室温为 30 时的温升为 46.7 。与 TPH3006 相比,采用 Si MOSFET IPB60R190C 效率最高为 95.91% ,其温升较高达到 81 。

理论计算中未考虑开关管电压电流尖峰、电路寄生参数影响等因素,因此实际测试结果较理论计算值低。实验证明采用 CascodeGaN HEMT TPH3006 的单相逆变器具有明显的效率优势。



(a) TPH3006 满载温升

(b) TPH3006 单相逆变器效率



(c) IPB60R190C6 满载温升

(d) IPB60R190C6 单相逆变器效率

图 16 基于 Cascode GaN HEMT TPH3006 和 Si MOSFET IPB60R190C6 单相逆变器温升及效率对比

Fig.16 Temperature and efficiency comparison of Cascode GaN HEMT TPH3006 based on single phase inverter and Si MOSFET IPB60R190C6 based on single phase inverter

6 结论

本文针对耗尽型 GaN HEMT 及 Cascode GaN HEMT 的输出伏安特性进行了详细分析,并在此基础上给出了 Cascode GaN HEMT 的稳态工作模式分析及不同工作模式出现的条件。Cascode GaN HEMT 具有耐高压、开关速度快、开关损耗低、低反向恢复特性等优点,可将其应用于单相逆变器。本文将 TPH3006 Cascode GaN HEMT 应用于单相全桥逆变器,仿真和实验验证证明了理论分析的正确性。与 Si MOSFET IPB60R190C 的对比实验可以看出,Cascode GaN HEMT 具有明显的效率优势。因此,将 Cascode GaN HEMT 应用于高压场合变换器,可以提高变换器的效率。

参考文献

- [1] S. Tamura, Y. Anda, M. Ishida, Y. Uemoto, T. Ueda, T. Tanaka, D. Ueda. Recent advances in gan power switching devices[C]. Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), 2010, 1-4.
- [2] M.J., Jinzhu Li, Jin Wang. Applications of Gallium Nitride in power electronics[C]. Power and Energy Conference at Illinois (PECI), 2013, 1-7.
- [3] Scott, M.J, Ke Zou, Inoa, E, Duarte, R., Yi Huang, Jin Wang. A Gallium Nitride switched-capacitor power inverter for photovoltaic applications[C]. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2012, 46-52.
- [4] Scott, M.J., Ke Zou, Jin Wang, et al. A Gallium Nitride switched-capacitor circuit using synchronous rectification[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(3):1383-1391.
- [5] Akira Nakajima, Kazuto Takao and Hiromichi Ohashi. GaN power transistor modeling for high-speed converter circuit design[J]. IEEE Transactions on Electron Devices. 2013, 60 (2): 646-651.
- [6] Bo Yang, Fred C. Lee and Alpha J. Zhang. LLC resonant converter for front end DC/DC conversion [C]. IEEE APEC. 2002, 2: 1108-1112.
- [7] 任小永,David Reusch,季 澍,穆明凯,Fred C Lee.氮化镓功率晶体管三电平驱动技术[J].电工技术学报, 2013, 28(5): 202-207.

Ren Xiaoyong, David Reusch, Ji Shu, Mu Mingkai, Fred C Lee. Three-level driving method for GaN power transistor[J]. Transaction of China Electro

- technical society, 2013, 28(5): 202-207.
- [8] Delaine, Johan, Jeannin, Pierre-Olivier, Frey, David, Guepratte, Kevin, "Improvement of GaN transistors working conditions to increase efficiency of A 100W DC-DC converter," Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) 3, 656-66, 2013.
- [9] Dong M, Elmes J, Peper M. Investigation on inherently safe gate drive techniques for normally-on wide bandgap power semiconductor switching devices[C]. Energy Conversion Congress and Exposition, 2009: 120-125.
- [10] Ishibashi T, Okamoto M, Hiraki E. Resonant gate driver for normally-on GaN high-electron-mobility transistor[C]. ECCE Asia Downunder (ECCE Asia), 2013: 365-371.
- [11] Liu Z, Huang X, Lee F C, Simulation model development and verification for high voltage GaN HEMT in Cascode structure[C]. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013: 3579-3586.
- [12] Y. F. Wu, R. Coffie, N. A. Fichtenbaum, Y. Dora, C. S. Suh, L. I. B. Shen, P. A. Parikh, and U. K. Mishra, Total GaN solution to electrical power conversion[J]. In Proc. 69th Annu. DRC, Jun. 2011: 217-218.
- [13] T. Morita, S. Tamura, Y. Anda, M. Ishida, Y. Uemoto, T. Ueda, T. Tanaka, and D. Ueda, 99.3% efficiency of three-phase inverter for motor drive using GaN-base gate injection transistors[C]. Power Electron.Conf. Expo. 2011:481-484.
- [14] Scott M J, Zou K, Wang J, et al. A gallium-nitride switched-capacitor circuit using synchronous rectification[C]. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011: 2501-2505.
- [15] Huang X, Li Q, Liu Z, et al. Analytical loss model of high voltage GaN HEMT in cascode configuration[C]. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013: 3587-3594.
- [16] IRF8707 器件手册[Z]. International Rectifier, 2008.
- [17] TPH3006 器件手册[Z]. Transphorm, 2012.

作者简介

李 艳 女, 1977 年生, 博士, 讲师, 研究方向为电动汽车车载电源、航天电源、太阳能并网系统和第三代宽禁带半导体器件器件的应用。

张雅静