

# 增强型 GaN HEMT 的结构原理及应用研究

蒋杰<sup>1</sup>, 裴云庆<sup>2</sup>, 王琳<sup>1</sup>, 陈庆来<sup>1</sup>, 王同连<sup>1</sup>

(1. 国网北京市电力公司海淀供电公司, 北京 海淀 100031;

2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要** 由氮化镓宽禁带半导体材料制成的高电子迁移率晶体管称为 GaN HEMT, 由于其突出的电气特性及物理化学特性, 在高频领域得到应用广泛。本研究对不同功率半导体材料特性进行对比, 从性能参数上分析氮化镓材料的应用优势, 并对 GaN HEMT 的工作原理、器件结构及当前主流封装形式进行分析说明; 在增强型 GaN HEMT 开关特性分析中, 对器件导通过程进行了研究, 并讨论了开关管在不同条件下的工作模式; 针对增强型 GaN HEMT 的驱动电路, 对驱动电阻的选取进行了计算分析, 并说明了 PCB 设计中的注意事项; 以反激型拓扑为例, 计算分析增强型 GaN HEMT 的通态损耗、开关损耗及栅极驱动损耗, 以期对相关人员进行借鉴。

**关键词** 氮化镓; 工作机理; 开关特性; 损耗分析

**中图分类号**: TN386

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.09.002

## 0 引言

第三代宽禁带功率半导体材料氮化镓 (GaN) 化学性质稳定、电离度高 (III-V 族化合物中最高), 熔点约 1 700 °C, 并具备带隙宽度大、击穿场强高、热稳定性强、漂移速度快等优势, 常应用于通信基站、交通信号、无人驾驶、医疗影像、国防工业等领域<sup>[1-2]</sup>。

根据导电方式不同, GaN HEMT 可分为增强型 GaN HEMT 及耗尽型 GaN HEMT。由于耗尽型 GaN HEMT 为常通型功率器件, 需要在栅极施加负压, 耗尽异质结间二维电子气, 才能关断器件, 易使功率开关误导通, 实际应用较少。增强型 GaN HEMT 为常断型功率器件, 无需在栅极施加负压关断, 应用可靠性更高。

## 1 GaN HEMT 的器件结构

### 1.1 功率半导体材料特性对比

在半导体材料性能参数中, 禁带宽度主要影响器件的耐压、耐高温能力及光学性能, 饱和电子迁移速度主要影响器件高频高压下工作性能<sup>[3]</sup>。JMF 和 BFOM 参数主要反映器件在高频、大功率场合下的应用潜力。第一代功率半导体硅 (Si) 材料, 由于禁带宽度窄、击穿场强低、电子迁移速度慢, 在高频大功率领域应用受到诸多限制。第二代功率半导体砷化镓 (AsGa) 材料, 电子迁移速度很高, 在光电子领域应用广泛。第三代功率半导体碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 材料, 具备禁带宽度高、击穿场强大、热导率高等优势, 碳化硅热导率很高, 常应用于高功率领域。相较于碳化硅,

氮化镓功率半导体材料具备更高的禁带宽度、击穿场强及电子迁移速度, 在高频应用领域优势明显<sup>[4]</sup>, 更高的功率密度也使得 GaN 基器件尺寸大大缩小。

### 1.2 高电子迁移率二维电子气

两种不同带隙的半导体材料接触界面间会形成异质结, 若窄带隙半导体侧不掺杂, 宽带隙的半导体侧掺入施主杂质, 则会在窄带隙 (本征) 半导体侧靠近异质结接触面形成量子势阱<sup>[5]</sup>, 势阱中电子即为二维电子气, 电子只能在二维平面内移动, 在三维空间内运动受到限制。由于本征半导体中二维电子气未受到电离杂质散射影响, 电子在二维平面上迁移速度非常高, GaN HEMT 利用此原理实现开关管的高速通断。

### 1.3 GaN HEMT 的器件结构与工作原理

GaN HEMT 基本结构由金属电极、势垒层、沟道层、缓冲层、衬底层等组成。氮化镓晶体层与氮化铝镓晶体层间形成异质结, 栅极为肖特基接触, 形成肖特基势垒, 接触电阻较大; 漏极与源极间为欧姆接触, 接触电阻小。当栅极电压变化时, 导电沟道分布情况发生改变, 异质结间二维电子气浓度随之变化, 以控制器件通断<sup>[6-7]</sup>。氮化镓衬底一直是制约器件发展的瓶颈, 有学者曾通过熔体法、气相法制备出单晶氮化镓材料, 但尺寸小、价格昂贵, 难以推广应用。目前常用异质外延法, 采用晶格匹配与热匹配性能较好的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiC、ZnO 材料作为衬底, 在衬底基础上外延生长出氮化镓晶体层, 并在衬底层与氮化镓晶体层之间增加 AlN

缓冲层以降低晶格失配。

### 1.4 GaN HEMT 的元件封装

目前, GaN HEMT 的主流封装形式主要包括塑封式和集成式两种封装形式。塑封式封装成本较低, 但寄生电感较大, 如: TO220、TO247、PQFN88 等。集成式封装热性能优越, 热阻很小, 如: 球栅网格阵列封装 (BGA)、平面网格阵列封装 (LGA) 等, BGA 封装体积小、功耗小, LGA 封装体积相对较大, 但导热性能优于 BGA 封装。

## 2 GaN HEMT 的开关特性分析

### 2.1 GaN HEMT 开通过程分析

与 Si MOSFET 类似, 增强型 GaN HEMT 在开关管导通过程中同样存在米勒效应, 如图 1 所示。增强型 GaN HEMT 的开通过程就是对极间电容充电的过程,  $C_{gs}$  为栅源极间电容,  $C_{gd}$  为栅漏极间电容 (米勒电容),  $C_{ds}$  为漏源极间电容, 输入电容大小为式 (1):

$$C_{iss} = C_{gs} + C_{gd} \quad (1)$$

栅源极电压  $V_{gs}$ 、栅漏极电压  $V_{gd}$ 、漏源极电压  $V_{ds}$  满足关系式 (2):

$$V_{gs} = V_{gd} + V_{ds} \quad (2)$$

在关断状态下, 栅源极间电容  $C_{gs}$  远大于栅漏极间电容  $C_{gd}$ 。

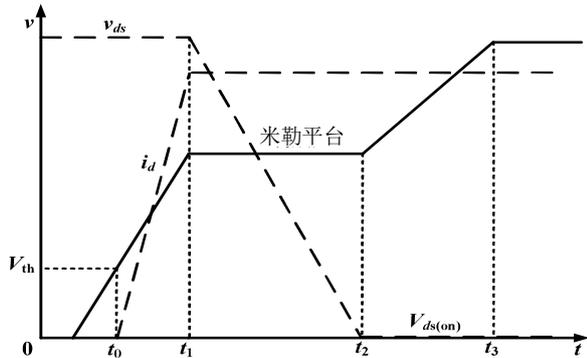


图 1 导通过程中米勒效应

$t_0$  时刻栅源极电压  $V_{gs}$  上升至阈值电压  $V_{th}$ , GaN HEMT 开始导通, 漏极电流  $i_d$  上升, 漏极电压  $V_d$  下降。 $t_1$  时刻开关管进入米勒平台,  $V_{gs}$  电压保持恒定, 此时栅极电流主要给米勒电容  $C_{gd}$  充电,  $V_{gd}$  电压上升,  $V_{ds}$  电压持续下降。 $t_2$  时刻米勒平台结束,  $V_{gs}$  电压继续上升至额定栅极电压,  $V_{ds}$  电压降至额定导通电压  $V_{ds(on)}$ , GaN HEMT 开通过程结束。

### 2.2 增强型 GaN HEMT 工作模式分析

由于增强型 GaN HEMT 开关管正反向均可以导通,

具有对称传导特性, 共包括四种工作模式:

1. 正向导通模式:  $V_{gs} \geq V_{th}$ ,  $V_{ds} \geq 0$ , 氮化镓与氮化铝镓异质结界间聚集大量的二维电子气, 导电沟道形成, 处于正向导通状态。

2. 正向截止模式:  $V_{gs} < V_{th}$ ,  $V_{ds} \geq 0$ , 开关管承受正向压降, 但导电沟道未形成, 处于正向截止状态。

3. 反向导通模式:  $V_{gd} \geq V_{th}$ ,  $V_{ds} < 0$ , 随着  $V_{gs}$  电压升高, 开关管管压降越低, 反向导通损耗越小, 并处于反向导通状态。

4. 反向截止状态:  $V_{gd} < V_{th}$ ,  $V_{ds} < 0$ , 开关管承受反向压降, 但导电沟道未形成, 处于反向截止状态。

## 3 增强型 GaN HEMT 驱动电路设计

相较于 Si MOSFET 功率器件, GaN HEMT 的驱动电压阈值范围窄, 对于增强型 GaN HEMT, 其驱动电压推荐范围为 4.5 ~ 5.5 V。高频工作下驱动电路易受干扰并产生电压尖峰或高频振荡, 稳定的驱动电路是 GaN HEMT 器件设计应用的关键。

### 3.1 驱动电阻的选取

驱动回路需选择合适的驱动芯片和驱动电阻。以 EPC2019 为例, 漏源极击穿电压  $V_{ds}$  为 200 V, 导通电阻  $R_{DS(on)}$  为 50 mΩ, 漏极电流  $I_D$  为 8.5 A, 采用栅极驱动芯片 UCC27611。UCC27611 通过驱动器内部线性稳压, 输出 5 V 精确电压, 并提供 4 A 峰值拉电流、6 A 峰值灌电流驱动能力, SON-6 封装最大限度地降低寄生电感, 抑制栅极振铃产生。如图 1 所示, 在增强型 GaN HEMT 的驱动回路中,  $i_g$  为门极驱动电流,  $L_g$  为栅极等效寄生电感,  $R_g$  为回路驱动电阻,  $L_s$  为源极等效寄生电感,  $C_{gs}$  为栅源极间电容, 回路导通时构成 RLC 二阶串联谐振电路, 可得式 (3):

$$(L_g + L_s) \frac{d^2 i_g}{dt^2} + R_g \frac{di_g}{dt} + \frac{1}{C_{gs}} i_g = 0 \quad (3)$$

当二阶回路处于临界阻尼或过阻尼状态时, 满足式 (4):

$$R_g \geq \sqrt{\frac{4(L_g + L_s)}{C_{gs}}} \quad (4)$$

### 3.2 PCB 设计注意事项

PCB 电路设计对增强型 GaN HEMT 的驱动电路设计存在很大影响, 驱动回路中需尽量满足元件封装小、引线长度短的要求, 缩短 PCB 走线距离, 降低回路寄生电感。

#### 4 增强型 GaN HEMT 损耗分析

本文以反激型变换电路为例,分析 EPC2019 在反激拓扑中的各项损耗,主要包括通态损耗、开关损耗及栅极驱动损耗。

##### 4.1 通态损耗

当增强型 GaN HEMT 导通时,漏源极间存在正向导通压降,由式(5),可得增强型 GaN HEMT 通态损耗大小为:

$$P_{sw,on} = I_{l,rms}^2 \cdot R_{ds,on} \quad (5)$$

式(5)中:  $I_{l,rms}$  为反激变换器输入电流有效值,  $R_{ds,on}$  为通态电阻。根据 EPC2019 的数据手册可知,  $R_{ds,on}$  为 50 mΩ。

##### 4.2 开关损耗

增强型 GaN HEMT 的开关损耗包括开通损耗及关断损耗。当反激变压器工作在 DCM 模式时,开关管导通时漏源极间电流从零开始逐渐增加,因此开通损耗近似为零。增强型 GaN HEMT 关断时漏源极间电压上升,电流下降,电压电流重叠部分会产生损耗,关断损耗计算公式为式(6):

$$P_{switchoff} = \frac{1}{2} (U_1 + nU_2) I_p t_{off} f_{sw} \quad (6)$$

式(6)中:  $U_1$  为反激变换器输入电压,  $U_2$  为反激变换器输出电压,  $n$  为反激变压器的匝数比,  $I_p$  为 GaN HEMT 关断峰值电流,  $t_{off}$  为关断时漏源极电压、电流重叠时间,  $f_{sw}$  为开关频率。由式(7),在半个工频周期内,开关管的关断损耗大小为:

$$\begin{aligned} P_{switchoff} &= \frac{1}{T_g/2} \sum_{i=1}^m \frac{u_{p(i)} i_{p(i)} t_{off}}{2} \\ &= \frac{1}{T_g} \sum_{i=1}^m \left( n \times \frac{U_1}{\lambda} \sin\left(\frac{i\pi}{m}\right) + U_1 \right) \left( \frac{U_1 T D_{max} \sin\left(\frac{i\pi}{m}\right)}{L_p} \right) t_{off} \quad (7) \\ &= \frac{U_1^2 D_{max} t_{off}}{L_p} \left( \frac{n}{4\lambda} + \frac{1}{\pi} \right) \end{aligned}$$

式(7)中:  $D_{max}$  为最大占空比,  $t_{off}$  为开关管从导通至关断的时间,  $L_p$  为反激变压器激磁电感大小。

##### 4.3 栅极驱动损耗

在增强型 GaN HEMT 导通及关断过程中,开关管极

间电容发生充放电,如果栅极总电荷量  $Q_g$  越大,栅极驱动电压  $V_g$  越高,会导致开关管的驱动损耗也越大。栅极驱动损耗的大小为式(8):

$$P_{drv} = V_g Q_g f_{sw} \quad (8)$$

根据 EPC2019 的数据手册,开关管的栅极总电荷量  $Q_g$  为 0.6nC,相较于同电压等级的 Si MOSFET,增强型 GaN HEMT 能够更迅速地实现开关管的导通与关断。

#### 5 结论

本文对第三代宽禁带半导体氮化镓的材料特性进行说明,分析了器件结构、工作原理及高电子迁移率二维电子气的形成机理,并对增强型 GaN HEMT 开通过程中存在的米勒效应进行分析说明。稳定的驱动电路设计是 GaN HEMT 器件应用的关键,在电力电路中需选用合适的驱动电阻、驱动芯片及合理的 PCB 布局设计。本文最后结合反激型变换电路对增强型 GaN HEMT 的器件损耗进行分析,主要包括开关管的通态损耗、开关损耗及栅极驱动损耗。

#### 参考文献:

- [1] 冯士维,邓兵,张亚民,等. AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管的可靠性[J]. 半导体技术,2014,39(03):226-232.
- [2] 任春江,陈堂胜,焦刚,等. 磁控溅射 AlN 介质 MIS 栅结构的 AlGaIn/GaN HEMT[J]. 固体电子学研究与进展,2009,29(03):330-333.
- [3] 刘燕丽,王伟,董燕,等. 结构参数对 N 极性面 GaN/InAlN 高电子迁移率晶体管性能的影响[J]. 物理学报,2019,68(24):294-300.
- [4] 赵勇兵,程哲,张韵,等. 具有高阈值电压和超低栅漏电的 400V 常关型槽栅 AlGaIn/GaN 金属氧化物半导体高电子迁移率晶体管[J]. 电工技术学报,2018,33(07):1472-1477.
- [5] 郑佳欣. AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管模型研究与功率放大器设计[D]. 西安:西安电子科技大学,2018.
- [6] 刘佳斌,肖曦,梅红伟. 基于 GaN-HEMT 器件的双有源桥 DC-DC 变换器的软开关分析[J]. 电工技术学报,2019,34(S2):534-542.
- [7] 韩克锋,王创国,朱琳,等. 0.5μm 栅长 HfO2 栅介质的 GaN 金属氧化物半导体高电子迁移率晶体管[J]. 西安交通大学学报,2017,51(08):77-81.