

# 基于表面势的增强型 p-GaN HEMT 器件模型

葛 晨<sup>1</sup>, 李 胜<sup>2</sup>, 张 弛<sup>2</sup>, 刘斯扬<sup>2</sup>, 孙伟锋<sup>1,2</sup>

(1. 东南大学微电子学院, 江苏无锡 214000; 2. 东南大学电子科学与工程学院, 江苏南京 210096)

**摘 要:** 为了满足功率电路及系统设计对 p-GaN HEMT(High Electron Mobility Transistor)器件模型的需求, 本文建立了一套基于表面势计算方法的增强型 p-GaN HEMT 器件 SPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)模型. 根据耗尽型 GaN HEMT 器件和增强型 p-GaN HEMT 器件结构的对比, 推导出 p-GaN 栅结构电压解析公式. 考虑到 p-GaN 栅掺杂效应和物理机理, 推导出栅电容和栅电流解析公式. 同时, 与基于表面势的高电子迁移率晶体管高级 SPICE 模型内核相结合, 建立完整的增强型 p-GaN HEMT 功率器件的 SPICE 模型. 将所建立的 SPICE 模型与实测结果进行对比验证. 结果表明, 所建立的模型准确实现了包括转移特性、输出特性、栅电容以及栅电流在内的 p-GaN HEMT 器件的电学特性. 模型仿真数据与实测数据拟合度误差均小于 5%. 本文所提出的增强型 p-GaN HEMT 器件模型在进行电路设计时具有重要的应用价值.

**关键词:** 增强型; 高级 Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis 模型; p-GaN 栅; 转移特性; 输出特性; 栅电容; 栅电流

中图分类号: TN389

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)05-1227-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210737

## Surface Potential Based E-mode p-GaN HEMT Device Model

GE Chen<sup>1</sup>, LI Sheng<sup>2</sup>, ZHANG Chi<sup>2</sup>, LIU Si-yang<sup>2</sup>, SUN Wei-feng<sup>1,2</sup>

(1. School of Microelectronic, Southeast University, Wuxi, Jiangsu 214000, China;

2. School of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** To meet the requirements for the power circuit and system design for enhancement-mode p-GaN HEMT (High Electron Mobility Transistor) device SPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) models, a model of enhancement-mode p-GaN HEMT device based on the surface potential calculation method is proposed in the paper. According to the comparison between the structures of the depletion-mode GaN HEMT device and the enhancement-mode p-GaN HEMT device, analytical formulas for the voltage of the p-GaN gate structure are derived. Considering the doping effect of p-GaN gate and physical mechanism, analytical formulas for the gate current and gate capacitance are derived. At the same time, combined with the ASM(Advanced SPICE Model) core, a complete SPICE model of enhancement-mode p-GaN HEMT power device is established. The established SPICE model is compared and verified with the measured results. The results show that the proposed model accurately realizes the electrical characteristics of p-GaN HEMT device including transfer characteristics, output characteristics, gate capacitance, and gate current. The simulation data of the model fits the measured data of the actual enhancement-mode p-GaN HEMT device well, and the fitting errors of the model simulation data and the measured data are less than 5%. The enhancement-mode p-GaN HEMT device model proposed in the paper, which is based on the perfect ASM-HEMT and considers the doping effect of p-GaN layer and physical mechanism of p-GaN gate structure, has important application value in circuit design.

**Key words:** enhancement-mode; advanced simulation program with integrated circuit emphasis model; p-GaN gate; transfer characteristics; output characteristics; gate capacitance; gate current

## 1 引言

氮化镓功率器件能够有效提高功率电子系统的能

量转换效率, 有望更新传统的电源系统. 其中具有代表性的 GaN 基高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transistor, HEMT)在高频、高功率、高压领域具有广

阔的应用前景.

出于安全性和低静态功耗的考虑,增强型 GaN HEMT 比耗尽型 GaN HEMT 更具有优势. 在几种实现增强型 GaN HEMT 技术中, p-GaN 栅技术成熟、成本低、效果好,成为商业化的首选结构<sup>[1-3]</sup>.

在使用 p-GaN HEMT 功率器件进行电路设计时,需要一个可靠、准确、收敛性好的 SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) 紧凑模型. 目前,文献中针对 p-GaN HEMT 功率器件建立 SPICE 紧凑模型有两种方法,即基于 MVSG (MIT Virtual Source GaN HEMT) 模型和基于 ASM (Advanced SPICE Model) 模型. 基于 MVSG 模型的方法利用隧穿效应建立终端电流方程,缺乏考虑栅结构金属/p-GaN 结与 p-GaN/AlGaIn/GaN 结的物理特性和 p-GaN 层的影响;基于 ASM 模型的方法假设 p-GaN 层完全耗尽,缺乏考虑肖特基金属/p-GaN 结的物理特性,并且栅压公式直接给出,缺乏物理意义,甚至没有针对 p-GaN 栅进行栅电流建模<sup>[4-7]</sup>.

本文建立基于表面势的增强型 p-GaN HEMT 器件 SPICE 模型,充分考虑 p-GaN 层的掺杂效应和栅结构金属/p-GaN 结与 p-GaN/AlGaIn/GaN 结物理特性的影响,将解析公式与基于表面势的 ASM 模型内核相结合,准确实现了包括转移特性、输出特性、栅电容以及栅电流在内的 p-GaN HEMT 器件的电学特性,对使用 p-GaN HEMT 功率器件进行电路设计具有重要的应用价值.

## 2 建模方法

图 1(a) 给出了 GaN HEMT 器件结构截面示意图,图 1(b) 给出了 p-GaN HEMT 器件结构截面示意图. 可见,增强型 p-GaN HEMT 器件结构是在耗尽型 GaN HEMT 器件结构的基础上插入了一个 p-GaN 层,而 p-GaN 层的插入又引入了金属/p-GaN 形成的肖特基结和 p-GaN/AlGaIn/GaN 形成的 pin 结.

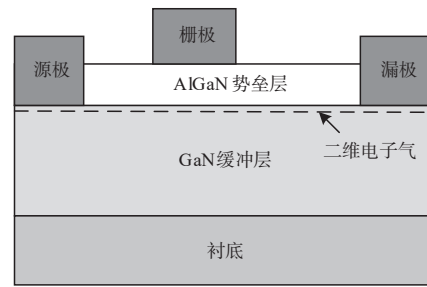
当对 GaN HEMT 器件和 p-GaN HEMT 器件的栅极施加相同的电压时,增强型 p-GaN HEMT 器件比 GaN HEMT 器件多了一个 p-GaN 层进行分压. 因此,对于增强型 p-GaN HEMT 器件,施加到 p-GaN 层以下任意一处的电压  $V_{p-GaNx}$  为:

$$V_{p-GaNx} = V_{GaNx} - V_{p-GaN} \quad (1)$$

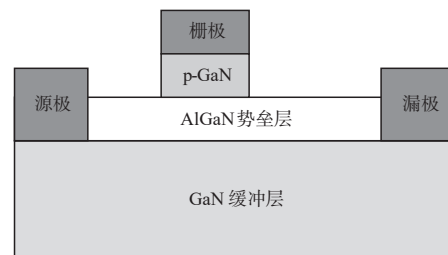
其中,  $V_{GaNx}$  是 GaN HEMT 器件中施加到栅以下任意一处的电压(与增强型 p-GaN HEMT 器件 p-GaN 层以下任意一处相对应),  $V_{p-GaN}$  是 p-GaN 层的电压降.

对于耗尽型 GaN HEMT 器件,已经建立了一套标准化的 ASM 模型,建模理论流程图如图 2(a) 所示. 通过 IC-CAP 软件运行模型进行仿真拟合,流程图如图 2(b) 所示.

耗尽型 ASM-HEMT 模型是一种基于表面势的模

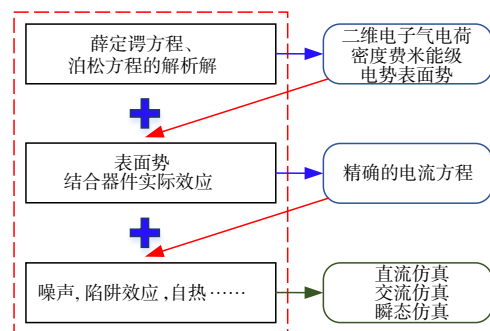


(a) GaN HEMT 器件结构截面示意图

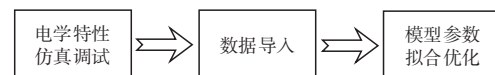


(b) p-GaN HEMT 器件结构截面示意图

图 1 GaN HEMT 器件与 p-GaN HEMT 器件结构对比图



(a) GaN HEMT ASM 建模理论流程图



(b) IC-CAP 软件运行流程图

图 2 GaN HEMT ASM 建模流程图

型,即通过求解二维电子气所对应的费米能级的电势从而计算沟道两端的表面势,进而建立模型. 二维电子气所对应的费米能级的电势是随着栅压变化而变化的. 参考文献[8],通过薛定谔方程和泊松方程建立费米能级电势  $V_f$  的超越方程,分区域求解超越方程最终得到费米能级电势  $V_f$  的表达式为<sup>[8]</sup>:

$$V_f = V_{go} - \frac{2V_t \ln \left[ 1 + e^{\frac{V_{go}}{2V_t}} \right]}{\frac{1}{H(V_{go,p})} + \frac{C_g}{qD} e^{\frac{-V_{go}}{2V_t}}} \quad (2)$$

$$V_{go} = V_g - V_{off} \quad (3)$$

$$H(V_{go}) = \frac{V_{go} + V_t \left[ 1 - \ln(\beta V_{gon}) \right] - \frac{\gamma_0}{3} \left( \frac{C_g V_{go}}{q} \right)^{\frac{2}{3}}}{V_{go} \left( 1 + \frac{V_t}{V_{god}} \right) + \frac{2\gamma_0}{3} \left( \frac{C_g V_{go}}{q} \right)^{\frac{2}{3}}} \quad (4)$$

$$V_{gon} = \frac{V_{go} \alpha_n}{\sqrt{V_{go}^2 + \alpha_n^2}}, V_{god} = \frac{V_{go} \alpha_d}{\sqrt{V_{go}^2 + \alpha_d^2}} \quad (5)$$

其中,  $V_g$  是栅极电压,  $V_{off}$  是器件的截止电压,  $V_t$  是热电压,  $C_g$  是单位面积栅电容且  $C_g = \epsilon/d$ ,  $\epsilon$  是 AlGaIn 的介电常数,  $d$  是 AlGaIn 势垒层厚度,  $q$  是电子电荷量,  $D$  是二维电子气状态密度,  $\gamma_0$  是常数,  $V_{gon}$ 、 $V_{god}$  是关于  $V_{go}$  的插值函数,  $\alpha_n = e/\beta$ ,  $\alpha_d = 1/\beta$ ,  $\beta = C_g/(qDV_t)$ , 当  $V_g > V_{off}$  时,  $V_{go,p} = V_{go}$ , 当  $V_g < V_{off}$  时,  $V_{go,p}$  与热电压  $V_t$  是同一个量级。

表面势  $\psi$  的表达式为:

$$\psi = V_t + V_x \quad (6)$$

其中,  $V_x$  是沟道上任意一点的电压。

利用表面势计算出漏源电流<sup>[9,10]</sup>:

$$I_{ds} = \frac{\mu_{eff} C_g}{\sqrt{1 + \theta_{sat}^2 \psi_{ds}^2}} \frac{W}{L} (V_{go} - \psi_m + V_t) \psi_{ds} (1 + \lambda V_{ds,eff}) \quad (7)$$

$$\psi_m = \frac{\psi_s + \psi_d}{2} \quad (8)$$

$$\psi_{ds} = \psi_d - \psi_s \quad (9)$$

$$V_{ds,eff} = V_{ds} \left( 1 + \left( \frac{V_{ds}}{V_{dsat}} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

其中,  $L$  是栅长,  $W$  是栅宽,  $\mu_{eff}$  是有效迁移率,  $\theta_{sat}$  是速度饱和参数,  $\lambda$  是沟道长度调制参数,  $\psi_s$  是源极表面势,  $\psi_d$  是漏极表面势,  $V_{ds}$  是漏源电压,  $V_{dsat}$  是漏极饱和电压。

对于增强型 p-GaN HEMT 器件, 只需要用  $V_{goeff}$  代替  $V_{go}$  即可:

$$V_{goeff} = V_g - V_{p-GaN} - V_{off} \quad (11)$$

$$I_{ds} = \frac{\mu_{eff} C_{AlGaIn}}{\sqrt{1 + \theta_{sat}^2 \psi_{ds}^2}} \frac{W}{L} (V_{goeff} - \psi_m + V_t) \psi_{ds} (1 + \lambda V_{ds,eff}) \quad (12)$$

其中,  $V_g$  是栅极电压,  $V_{p-GaN}$  是 p-GaN 层的电压降,  $C_{AlGaIn}$  是 AlGaIn 势垒层单位面积电容且  $C_{AlGaIn} = \epsilon_{AlGaIn}/t_{AlGaIn}$ ,  $t_{AlGaIn}$  是 AlGaIn 势垒层的厚度,  $\epsilon_{AlGaIn}$  是 AlGaIn 的介电常数。

因此, 在增强型 p-GaN HEMT 器件模型建立的过程中, p-GaN 层电压降的求解尤为重要, 求解 p-GaN 层电压降表达式便能得到 p-GaN HEMT 器件漏源电流表达式。

同时, p-GaN 层电压降的求解可以辅助建立 p-GaN HEMT 器件的栅电容模型和栅电流模型。

### 3 模型解析

p-GaN 层的插入引入了肖特基金属/p-GaN 形成的肖特基结和 p-GaN/AlGaIn/GaN 形成的 pin 结, 因此 p-GaN 层的掺杂效应和肖特基结、pin 结的物理特性对 p-GaN HEMT 器件建模至关重要。

#### 3.1 IV 特性模型解析

p-GaN 层的插入引入了肖特基金属/p-GaN 结, 如图 3(a) 所示。当栅极电压发生变化时, 肖特基金属/p-GaN 结处的耗尽区宽度也会发生变化。

p-GaN 层的电压降  $V_{p-GaN}$  为:

$$V_{p-GaN} = V_{bi} + V_{jsch} \quad (13)$$

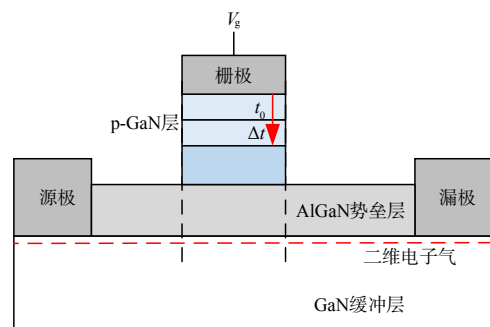
其中,  $V_{bi}$  是肖特基金属/p-GaN 接触的内建电势,  $V_{jsch}$  是肖特基金属/p-GaN 结电压。

肖特基金属/p-GaN 结等效电路图如图 3(b) 所示, 即肖特基结电容。肖特基结电容  $C_{jsch}$  是一个可变电容, 其值与肖特基结电压相关:

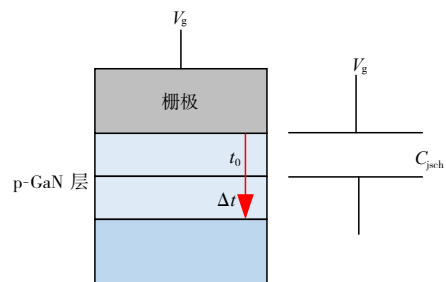
$$C_{jsch} = \sqrt{\frac{q\epsilon_{GaN} N_A}{2(V_{bi} + V_{jsch})}} \quad (14)$$

其中,  $\epsilon_{GaN}$  是 GaN 的介电常数,  $N_A$  是 p-GaN 层掺杂杂质 Mg 的浓度,  $V_{bi}$  是肖特基金属/p-GaN 接触的内建电势。

对于肖特基金属/p-GaN 结经过的动态电荷



(a) p-GaN HEMT 栅下结构示意图 ( $t_0$  是由肖特基金属/p-GaN 接触内建电势导致的耗尽区宽度,  $\Delta t$  是由肖特基金属/p-GaN 结电压导致的耗尽区宽度)



(b) 肖特基金属/p-GaN 结等效电路图

图3 p-GaN HEMT 器件 IV 特性模型解析图

$dQ_{\text{jsch}}$ , 有:

$$dQ_{\text{jsch}} = C_{\text{jsch}} dV_{\text{jsch}} \quad (15)$$

因此肖特基金属/p-GaN 结的电荷  $Q_{\text{jsch}}$  由式(15)积分求出:

$$Q_{\text{jsch}} = \int dQ_{\text{jsch}} = \int C_{\text{jsch}} dV_{\text{jsch}} \quad (16)$$

最终可以得到:

$$Q_{\text{jsch}} = 2V_{\text{bi}} \sqrt{\frac{q\varepsilon_{\text{GaN}} N_{\text{A}}}{2V_{\text{bi}}} \left( 1 + \frac{V_{\text{jsch}}}{V_{\text{bi}}} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (17)$$

根据电荷平衡原理, 肖特基结电容经过的动态电荷  $dQ_{\text{jsch}}$  与动态沟道电荷  $dQ_{\text{ch}}$  相等:

$$dQ_{\text{jsch}} = dQ_{\text{ch}} \quad (18)$$

肖特基结电荷是零栅极偏置时的静电荷  $Q_0$  与沟道电荷  $Q_{\text{ch}}$  之和:

$$Q_{\text{jsch}} = Q_0 + Q_{\text{ch}} \quad (19)$$

$$Q_0 = 2V_{\text{bi}} \sqrt{\frac{q\varepsilon_{\text{GaN}} N_{\text{A}}}{2V_{\text{bi}}}} \quad (20)$$

通过式(17)、式(19)和式(20), 最终可以得到:

$$V_{\text{jsch}} = V_{\text{bi}} \left[ \left( 1 + \frac{Q_{\text{ch}}}{\sqrt{2q\varepsilon_{\text{GaN}} N_{\text{A}} V_{\text{bi}}}} \right)^2 - 1 \right] \quad (21)$$

将式(21)代入式(13)可得到 p-GaN 层电压降的解析公式:

$$V_{\text{p-GaN}} = V_{\text{bi}} + V_{\text{bi}} \left[ \left( 1 + \frac{Q_{\text{ch}}}{\sqrt{2q\varepsilon_{\text{GaN}} N_{\text{A}} V_{\text{bi}}}} \right)^2 - 1 \right] \quad (22)$$

将求解的 p-GaN 层电压降解析公式代入到 ASM-HEMT 内核中从而建立 p-GaN 栅 IV 特性解析模型。

然而, 在增强型 p-GaN HEMT 器件中, p-GaN 层的插入会影响 AlGaIn/GaN 异质结处二维电子气的分布, 因此耗尽型 GaN HEMT 器件中的  $V_{\text{off}}$  不再适用于增强型 p-GaN HEMT 器件, 从而需要对 p-GaN HEMT 器件中的  $V_{\text{off}}$  进行重新定义:

$$V_{\text{off}} = \phi_{\text{B}} + V_{\text{bi}} + \frac{\Delta E_{\text{c1}}}{q} - \frac{\Delta E_{\text{c2}}}{q} - V_{\text{b}} \quad (23)$$

其中,  $\phi_{\text{B}}$  是金属的势垒高度,  $V_{\text{bi}}$  是肖特基金属/p-GaN 接触的内建电势,  $\Delta E_{\text{c1}}$  是 p-GaN 和 AlGaIn 之间的导带差,  $\Delta E_{\text{c2}}$  是 AlGaIn 和 GaN 之间的导带差,  $V_{\text{b}}$  是 AlGaIn 势垒层上的电压降<sup>[7]</sup>。

将式(23)代入式(11), 得到 p-GaN HEMT 器件模型的漏源电流方程为:

$$V_{\text{goeff}} = V_{\text{g}} - V_{\text{p-GaN}} - V_{\text{off}} \quad (24)$$

$$I_{\text{ds}} = \frac{\mu_{\text{eff}} C_{\text{AlGaIn}}}{\sqrt{1 + \theta_{\text{sat}}^2 \psi_{\text{ds}}^2}} \frac{W}{L} (V_{\text{goeff}} - \psi_{\text{m}} + V_{\text{t}}) \psi_{\text{ds}} (1 + \lambda V_{\text{ds, eff}}) \quad (25)$$

### 3.2 栅电容模型解析

在 p-GaN HEMT 器件中, p-GaN 层的插入引入了肖特基金属/p-GaN 结和 p-GaN/AlGaIn/GaN 结, 栅电容模型可以等效为两个结电容的串联, 等效电路图如图 4 所示。

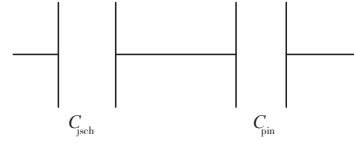


图4 p-GaN HEMT 栅电容模型等效电路图

因此, 可以求得栅电容为<sup>[11]</sup>:

$$\frac{1}{C_{\text{G}}} = \frac{1}{C_{\text{jsch}}} + \frac{1}{C_{\text{pin}}} \quad (26)$$

其中,  $C_{\text{G}}$  是栅电容,  $C_{\text{jsch}}$  为肖特基金属/p-GaN 结电容,  $C_{\text{pin}}$  为 p-GaN/AlGaIn/GaN 结电容。

对于肖特基金属/p-GaN 结电容  $C_{\text{jsch}}$ , 可由式(14)、式(21)得到。

对于 p-GaN/AlGaIn/GaN 结电容  $C_{\text{pin}}$ , 可由 p-GaN/AlGaIn/GaN 结电压  $V_{\text{pin}}$  和 p-GaN/AlGaIn/GaN 结经过的电荷  $Q_{\text{pin}}$  求得:

$$V_{\text{pin}} = V_{\text{AlGaIn}} + \psi_{\text{s}} = \frac{qn_{\text{s}} t_{\text{AlGaIn}}}{\varepsilon_{\text{AlGaIn}}} + \psi_{\text{s}} \quad (27)$$

$$Q_{\text{pin}} = Q_{\text{ch}} \quad (28)$$

$$C_{\text{pin}} = \frac{Q_{\text{pin}}}{V_{\text{pin}}} = \frac{1}{\frac{t_{\text{AlGaIn}}}{\varepsilon_{\text{AlGaIn}}} + \frac{\psi_{\text{s}}}{Q_{\text{ch}}}} \quad (29)$$

其中,  $V_{\text{AlGaIn}}$  是 AlGaIn 势垒层上的电压降,  $t_{\text{AlGaIn}}$  是 AlGaIn 层的厚度,  $\varepsilon_{\text{AlGaIn}}$  是 AlGaIn 的介电常数,  $n_{\text{s}}$  是二维电子气电荷密度,  $Q_{\text{ch}}$  是沟道电荷。

### 3.3 栅电流模型解析

p-GaN 层的插入引入了肖特基金属/p-GaN 结和 p-GaN/AlGaIn/GaN 结, 栅电流模型可以等效为两个背靠背的二极管, 等效电路图如图 5 所示。

当栅压  $V_{\text{g}} > 0\text{V}$  时, 肖特基金属/p-GaN 形成的肖特基结 D1 反偏, 而 p-GaN/AlGaIn/GaN 形成的 pin 结 D2 正偏,

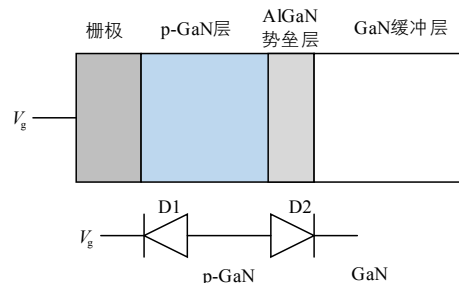


图5 p-GaN HEMT 栅电流模型等效电路图

此时反向热辅助隧穿电流通过肖特基结,热电子发射通过 p-GaN/AlGaIn/GaN 异质结. 因此,栅电流为:

$$J_1 = A \cdot J_{10} \cdot T^2 \cdot \left[ e^{\frac{\phi_{p-GaN} - \phi_{GaN}}{n_1 V_t}} - 1 \right] \quad (30)$$

其中,  $A$  是栅的面积,  $J_{10}$  是饱和电流密度,  $T$  是温度,  $n_1$  是理想因子,  $V_t$  是热电压,  $\phi_{p-GaN}$  是 p-GaN 层的电势,  $\phi_{GaN}$  是 GaN 层的电势.

当栅压  $V_g < 0$  V 时,肖特基结 D1 正偏,而 pin 结 D2 反偏,此时泄漏路径位于 p-GaN 栅极的边缘,在该边缘,电子沿 AlGaIn 表面传输跳跃至源漏端. 因此,栅电流为<sup>[12]</sup>:

$$J_2 = P \cdot J_{20} \cdot e^{-T \cdot 0.25} \cdot \left[ e^{\frac{\phi_{p-GaN}}{n_2 V_t}} - 1 \right] \quad (31)$$

其中,  $P$  是栅的周长,  $J_{20}$  是饱和电流密度,  $n_2$  是理想因子.

### 4 模型实现与验证

在实际案例中,通过 B1500 半导体参数测试仪测试得到 p-GaN HEMT 器件的电学特性,增强型 p-GaN HEMT 器件模型通过 Verilog-A 代码实现,通过 IC-CAP 建模软件得到 p-GaN 栅模型的仿真数据,并对测试数据和仿真数据进行拟合验证. 其中, p-GaN HEMT 器件部分结构参数如表 1 所示.

表 1 p-GaN HEMT 器件部分参数

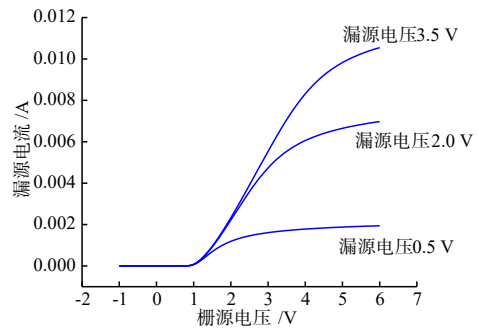
参数名称	数值
栅长 $L$	1 $\mu\text{m}$
栅宽 $W$	9 $\mu\text{m}$
栅漏间距 $L_{GD}$	1 $\mu\text{m}$
栅源间距 $L_{GS}$	1 $\mu\text{m}$

增强型 p-GaN HEMT 器件模型的转移特性、输出特性仿真结果如图 6(a)、图 6(b) 所示. 通过转移特性仿真图和输出特性仿真图可以看出,该模型的阈值电压大于 0,实现了增强型 p-GaN 栅.

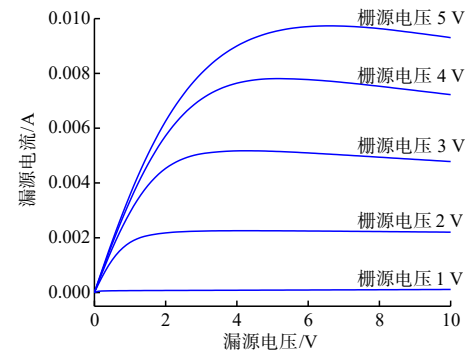
将仿真数据与测试数据进行拟合验证,拟合结果图如图 7 所示.

漏源电压分别为 0.5 V、2 V 和 3.5 V 下的转移特性拟合结果图如图 7(a) 所示,栅源电压从 -1 V~6 V 线性增加,步长为 0.07 V. 相同条件下,ASM-HEMT 即现有模型的转移特性拟合效果如图 7(b) 所示.

将图 7(a) 和图 7(b) 进行对比可以看出,现有模型在高漏源电压下转移特性拟合效果不是很好,原因在于现有模型在建模过程中缺乏考虑 p-GaN HEMT 器件栅结构金属/p-GaN 结动态物理特性,电流公式存在偏差,随着漏源电压增加,转移特性拟合误差增加. 本文提出的 p-GaN HEMT 器件模型在建模过程中充分考虑 p-GaN HEMT 器件栅结构金属/p-GaN 结动态物理特性,



(a) 增强型 p-GaN HEMT 器件模型转移特性仿真结果图



(b) 增强型 p-GaN HEMT 器件模型输出特性仿真结果图

图 6 增强型 p-GaN HEMT 器件模型仿真结果图

因此在高低漏源电压下的转移特性拟合误差都较小.

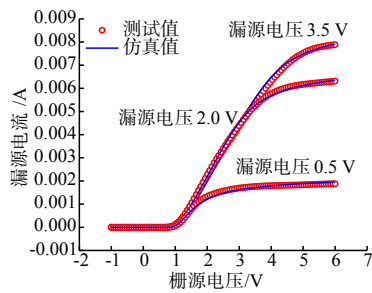
栅源电压分别为 1 V、2 V、3 V、4 V 和 5 V 下的输出特性拟合结果图如图 7(c) 所示,漏源电压从 0 V~10 V 线性增加,步长为 0.1 V,DC-IV 测试. 相同条件下,ASM-HEMT 即现有模型的输出特性拟合效果如图 7(d) 所示.

将图 7(c) 和图 7(d) 进行对比可以看出,现有模型在高栅源电压下输出特性拟合效果不是很好,原因在于现有模型在建模过程中缺乏考虑 p-GaN HEMT 器件栅结构金属/p-GaN 结动态物理特性,随着栅压增加,输出特性线性区拟合误差增加. 本文模型在建模过程中充分考虑 p-GaN HEMT 器件栅结构金属/p-GaN 结动态物理特性,因此在高低栅源电压下的输出特性拟合误差都较小.

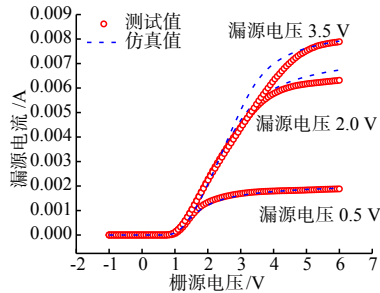
栅电容拟合结果图如图 7(e) 所示,栅源电压从 -1 V~6 V 线性增加,步长为 0.07 V,测试频率为 1 MHz,交流信号幅值 level=30 mV. 相同条件下,ASM-HEMT 即现有模型的栅电容拟合结果图如图 7(f) 所示.

将图 7(e) 和图 7(f) 进行对比可以看出,现有模型在栅压小于阈值电压时的拟合效果不是很好,原因在于现有模型在建模过程中缺乏考虑栅结构 p-GaN/Al-GaN/GaN 结构的物理特性,电容公式存在偏差. 本文模型充分考虑 p-GaN/AlGaIn/GaN 结构物理特性,因此整体栅电容拟合误差都较小.

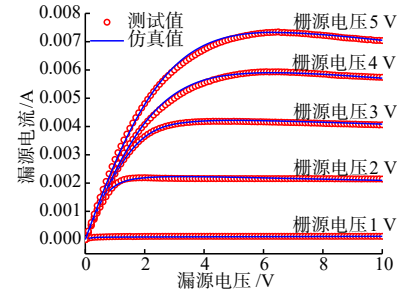
栅电流拟合结果图如图 7(g) 所示,栅源电压从 -3 V~



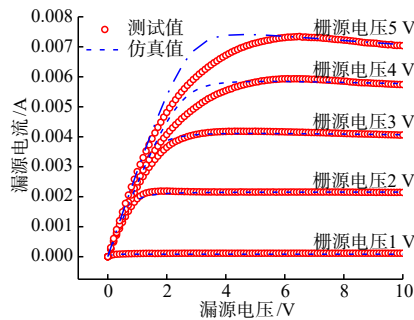
(a) 增强型 p-GaN HEMT 器件模型转移特性拟合结果图



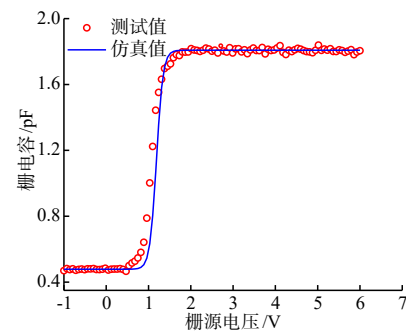
(b) ASM-HEMT 即现有模型转移特性拟合结果图



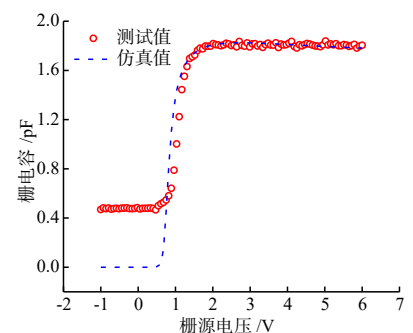
(c) 增强型 p-GaN HEMT 器件模型输出特性拟合结果图



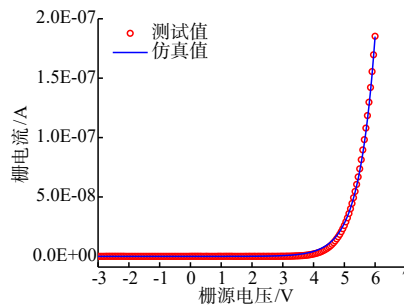
(d) ASM-HEMT 即现有模型输出特性拟合结果图



(e) 增强型 p-GaN HEMT 器件模型栅电容拟合结果图



(f) ASM-HEMT 即现有模型栅电容拟合结果图



(g) 增强型 p-GaN HEMT 器件模型栅电流拟合结果图

图7 增强型 p-GaN HEMT 器件模型拟合结果图

6 V 线性增加,步长为 0.1 V.

现有模型并没有对栅电流进行建模,本文模型增加了 p-GaN HEMT 器件栅电流的建模,且拟合误差较小.

通过拟合结果图可以看出,本文模型输出特性、转移特性、栅电容以及栅电流的拟合误差均小于 5%,拟合效果很好,说明该模型具有可行性,对使用 p-GaN HEMT 功率器件进行电路设计具有重要应用价值.

### 5 结论

本文建立了一套基于表面势的增强型 p-GaN HEMT 器件模型. 该模型在同时考虑 p-GaN 层的掺杂效应和肖特基金属/p-GaN 结、p-GaN/AlGaIn/GaN 结物理特性的基础

上,推导出 p-GaN 栅结构解析公式,并将其与耗尽型 ASM-HEMT 内核相结合,对 p-GaN HEMT 功率器件的输出特性、转移特性、栅电容以及栅电流进行建模. 模型仿真结果表明,该方法实现了增强型 p-GaN 栅模型的建立,同时拟合结果表明,该模型仿真数据与器件测试数据显示出良好的一致性,输出特性、转移特性、栅电容以及栅电流的拟合误差均小于 5%,表明该模型对以 p-GaN HEMT 功率器件为基础的电路设计仿真具有重要应用价值.

### 参考文献

[1] JOHNSON J, CAO D, LYU X, et al. GaN based inverter with high conversion ratio and sinusoidal output for motor

- drive applications stress analysis[C]//BOB KAPLAR. 2017 IEEE 5th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications(WiPDA). Albuquerque:IEEE,2017:195-200.
- [2] YANG S, ZHOU C, HAN S, et al. Impact of substrate bias polarity on buffer-related current collapse in AlGaIn/GaN-on-Si power devices[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64(12): 5048-5056.
- [3] MURUKESAN K, EFTHYMIU L, UDREA F. Gate stress induced threshold voltage instability and its significance for reliable threshold voltage measurement in p-GaN HEMT[C]//VICTOR VELIADIS. 2019 IEEE 7th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications(WiPDA). Raleigh: IEEE, 2019: 177-180.
- [4] YOU S, LI X, DECOUTERE S, et al. Monolithically integrated GaN power ICs designed using the MIT virtual source GaNFET(MVSG) compact model for enhancement-mode p-GaN gate power HEMTs, logic transistors and resistors[C]//DEMINS RIDEAU. ESSDERC 2019-49th European Solid-State Device Research Conference(ESSDERC). Cracow: IEEE, 2019: 158-161.
- [5] RADHAKRISHNA U, CHOI P, ANTONIADIS D A. Facilitation of GaN-based RF- and HV-circuit designs using MVS-GaN HEMT compact model[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(1): 95-105.
- [6] MAHAJAN D, KHANDELWAL S. Impact of p-GaN layer doping on switching performance of enhancement mode GaN devices[C]//CURRAN. 2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics(COMPEL). Padua: IEEE, 2018: 1-4.
- [7] MODOLO N, TANG S W, JIANG H J, et al. A novel physics-based approach to analyze and model E-mode p-GaN power HEMTs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(4): 1489-1494.
- [8] KHANDELWAL S, CHAUHAN Y S, FJELDLY T A. Analytical modeling of surface-potential and intrinsic charges in AlGaIn/GaN HEMT devices[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2012, 59(10): 2856-2860.
- [9] DASGUPTA A, GHOSH S, AHSAN S A, et al. Modeling DC, RF and noise behavior of GaN HEMTs using ASM-HEMT compact model[C]//YOGESH VERMA. 2016 IEEE MTTT International Microwave and RF Conference (IMaRC). New Delhi: IEEE, 2016: 1-4.
- [10] DASGUPTA A, GHOSH S, CHAUHAN Y S, et al. ASM-HEMT: compact model for GaN HEMTs[C]//JUN J LIU. 2015 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits(EDSSC). Singapore:

IEEE, 2015: 495-498.

- [11] WU T L, BAKEROOT B, LIANG H, et al. Analysis of the gate capacitance—voltage characteristics in p-GaN/AlGaIn/GaN heterostructures[J]. Electron Device Letters IEEE, 2017, 38(12): 1696-1699.
- [12] WANG J, CHEN Z, YOU S, et al. Surface-potential-based compact model for the gate current of p-GaN gate HEMTs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(9): 3564-3567.

#### 作者简介



葛 晨 女,1997年5月出生于江苏宿迁。现为东南大学微电子学院研究生。研究方向为功率半导体器件可靠性。

E-mail: 220194942@seu.edu.cn



李 胜 男,1993年4月出生于湖北随州。2016年获得郑州大学电子科学与技术专业学士学位。现为东南大学国家ASIC系统工程研究中心微电子学与固态电子学博士。主要研究方向为GaN功率器件的可靠性和建模。

E-mail: seulisheng@seu.edu.cn



张 弛 男,1995年9月出生于江苏扬州。2017年获得合肥工业大学电子科学与技术学士学位。现为东南大学国家ASIC系统工程研究中心微电子与固态电子学博士。主要研究方向为GaN功率器件设计与可靠性。

E-mail: galazhang@seu.edu.cn



刘斯扬(通讯作者) 男,1987年5月出生于安徽合肥。现为东南大学电子科学与工程学院教授、博士生导师。主要研究方向为新型功率器件设计、功率集成电路设计和功率器件建模。

E-mail: liusy2017@seu.edu.cn



孙伟锋 男,1977年5月出生于江苏武进。现为东南大学电子科学与工程学院教授、博士生导师。主要研究方向为新型功率器件设计、功率集成电路设计、功率器件建模和射频器件设计。

E-mail: swffrog@seu.edu.cn