新型 4H-SiC 射频功率 MESFET 大信号经验电容模型

刘莹 国云川 黄文

(电子科技大学电子工程学院,成都 610054)

摘 要: 基于 4H-SiC 射频功率 MESFET 器件的工作机理,提出了一种新型的大信号经验电容模型。针对此模型参数的提取采用最小二乘法和遗传算法,算法用 MATLAB 语言实现,与传统算法相比,经验电容模型参数的初值估计和优化更为简单准确。提取的模型重要参数具有一定的物理意义,其他拟合参数值也具有物理量级。模型仿真结果和实测数据拟合度较好,从而验证了所提出的大信号经验电容模型的准确性。

关键词: 4II-碳化硅; 金属半导体场效应晶体管; 大信号模型; 经验电容模型; 遗传算法

Novel Empirical Large-Signal Capacitance Model for 4H-SiC

RF Power MESFET

LIU Ying, GUO Yun-chuan, HUANG Wen

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: A novel empirical large-signal capacitance model for 4H-SiC RF power MESFET is presented based on the operational principle of devices. The least squares method and genetic algorithm are used to optimize the parameter extraction, and MATLAB is used to realize it. Compared with the traditional algorithm, the initial value computing and optimizing of model parameters is more simple and accurate. The main extracted parameters are physical proposed, and other fitting parameters also have physical magnitude. The simulation result fits well with the testing data, which shows the present model has good accuracy.

Key words: 4H-SiC; MESFET; large-signal model; empirical capacitance model; genetic algorithm

引 言

碳化硅 (SiC) 半导体材料具有宽禁带、高击 穿电场、高载流子漂移速度以及高热导率等优良特 性,非常适合于高温、高功率的工作环境,此时 GaAs 微波功率器件则失去了它的优势。基于 4H-SiC 材料的金属半导体场效应晶体管 (MESFET)具有击穿电压大、电子迁移率高、输 出功率大、耐高温等特性,在射频、微波大功率领 域中,尤其是移动通信基站发射模块、相控阵雷达 系统等方面得到广泛的应用[1]。精确的大信号模型 是利用射频微波电路计算机辅助设计(CAD)工具 进行器件和电路的优化、电路性能评估以及加快电 路设计进程的一个关键问题,其中大信号电容模型 是大信号建模的重要部分^[2]。由于场效应晶体管大 信号电容模型受到栅压和漏压的共同控制,而且漏 压工作电压高、夹断电压大、杂质的不完全离化特 性和沟道调制效应的影响,4H-SiC MESFET 器件的 大信号模型的精确性还有待进一步提高。对 4H-SiC MESFET 大信号电容模型的研究已有较多报道,表 格模型和解析模型的通用性不强,在 CAD 工具中 较少采用,目前,经验模型因其简单、较为准确且 适用于 CAD 软件的优点,应用最为广泛^[3]。

本文首先提出了一种新型的 4H-SiC MESFET 非线性经验电容模型,然后针对此模型参数的提取

采用最小二乘法来拟合实测数据,参数提取的优化 方法为遗传算法。最后将提出的模型仿真结果与实 测数据进行比较,两者的拟合度较好,从而验证了 文中模型的准确性。

1 4H-SiC MESFET 非线性经验电容模型

本文采用栅宽为1mm的4H-SiC MESFET器件, 基于实测数据进行大信号经验电容建模。在此之前,应使用"冷FET法"提取等效模型寄生参数值, 然后根据实测S参数提取出不同有源偏置条件下的 非线性电容实测值^[4]。4H-SiC MESFET大信号等效 电路模型如图1所示。其中虚线框内是本征参数, 虚线框外是寄生参数,Rds用来模拟缓冲层的电泄 漏,Csf用来模拟色散效应^[5]。



图 1 4H-SiC MESFET 大信号模型等效电路

1.1 栅源电容 Cgs (Vgs, Vas) 模型

栅源电容形成于 MESFET 的栅下耗尽层,在均

匀掺杂的情况下,栅偏置越接近夹断区,耗尽层越深,*C_{gs}越小*:反之则越大。由于耗尽层宽度随漏偏压增加而增加,*C_{gs}*随漏偏压增加也略有增加^[6]。

采用基于 Angelov 模型的双曲正切函数表达 式,栅源电容受栅压和漏压的共同控制。因此提出 的栅源电容大信号经验电容模型的表达式为:

$$C_{gs} = C_{gs0} + C_{gs1}(1 + \tanh(\phi_1))(1 - \tanh(\phi_2)) \quad (1)$$

其中

$$\phi_1 = A + BV_{ds} + CV_{ds}^{2}$$
$$\phi_2 = A_1 + B_1 V_{gs}$$

此模型中 C_{gs0} 为零栅偏压的栅源电容,其余参数为拟合参数。

1.2 栅漏电容 Cgd (Vgs, Vds) 模型

栅漏电容的非线性关系形成原因主要是在载流子速度饱和后在漏侧形成的电荷累积和边缘电流的共同作用^[6]。由于 SiC MESFET 的高偏置电压 工作特性,电荷累积所呈现出来的非线性要比 GaAs MESFET 更为明显,因此采用指数函数代替双曲正 切函数来描述栅漏电容的大信号经验模型:

$$C_{gd} = C_{gd0} + C_{gd1}(\exp(\phi_1))(\exp(\phi_2)) \quad (2)$$

其中

$$\phi_1 = AV_{gs} + B$$

 $\phi_2 = A_1 V_{ds}$

此模型中 C_{gd0} 为零栅偏压的栅漏电容,其余参

数为拟合参数。

1.3 漏源电容 Cos(Vgs, Vos)模型

漏源电容 *C*_{ds} 随端电压的变化很小,因此在小 信号和大信号分析中通常都将其视为常数,这个数 值在理论上可认为是由栅漏间形成的边缘电容和 衬底隔离层(p-buffer)电容效应的共同作用确定。 近似认为总栅源电容值是栅漏间形成的边缘电容 计算值的 2~3 倍^[7]。

边缘电容的理论计算公式为:

$$C_{dsp} = (1 + \varepsilon_r) \cdot \varepsilon_o \cdot W \cdot \frac{K(\sqrt{1 - k^2})}{K(k)}$$
(3)

其中 K (k) 为第一类完全椭圆积分,

$$k = \sqrt{\frac{(2L_s + L_{ds})Lds}{(L_s + L_{ds})^2}}, Ls 为源区金属长, Lds 为源$$

漏间距。

因此, $C_{ds} = (2 \sim 3)C_{dsp}$ 。

2 模型参数提取方法

模型的各参数提取采用最小二乘法^[2],优化过 程的品质函数为:

$$\chi^{2}(a) = \sum_{j=1}^{N1} \{ \sum_{i=1}^{N2} \left[\frac{y_{ij} - y(x_{ij}, a)}{\sigma_{ij}} \right] \}$$
(4)

式中 y_{ii} 、 $y(x_{ii}, a)$ 分别是计算得到的数据和测

试数据, σ_{ij} 是第ij个数据点的标准偏差。

采用 MATLAB 工具箱中的遗传算法来拟合实 测数据得到最小的品质函数,遗传算法流程图如图 2 所示。遗传算法的本质是一种求解问题的高度并 行、随机、自适应全局搜索方法,与传统搜索方法 相比具有使用简单、稳健性强、易于并行化处理等 优点^[8]。



图 2 使用遗传算法提取模型参数流程图

3 模型结果与讨论

图 3 和图 4 分别为 C_{gs}、C_{gd}大信号经验模型仿 真结果和实测数据的比较,从图中可以看出,模型 仿真结果和实测数据拟合较好。表 1 和表 2 分别为 提取的 C_{gs}、C_{gd}大信号经验模型参数值,可以看出 提取的重要参数 C_{gs0}、 C_{gd0}与实测值具有相同的物 理量级,具有一定的物理意义。



图 3 Cgs 仿真结果与实测数据比较, V_{gs}=-2V~-14V, 步进-2V, V_{ds}=0V~40V, 步进 4V



图 4 C_{gd} 仿真结果与实测数据比较, V_{gs} =-2V~-14V, 步进-2V, V_{ds} =0V~40V, 步进 4V

C_{es0}/F	C_{os1}/F	Α	В
0.045e-12	0.2596e-12	-0.07232	-0.01793
С	A_{1}	B_1	
2.3671e-4	-0.1943	-0.026	

表1 提取的栅源电容Cgs参数

表2 提取的栅漏电容Cgd参数

$C_{_{ad0}}/F$	$C_{_{ad1}}/\mathrm{F}$	Α	В	A_{1}
0.1316e-12	1.029e-12	0. 1812	-0.1	-0.1306

4 结论

本文提出了一种新型的 4H-SiC 射频功率 MESFET 非线性经验电容模型,采用最小二乘法和 遗传算法提取了模型的各参数值,使模型参数的初 值估计和优化更为简单准确,并且经验电容模型的 重要参数具有物理意义,拟合参数值也具有物理量 级。提出的电容模型的仿真结果和实测数据拟合度 较好,从而验证了此模型的准确性。因此,基于此 经验电容模型的器件参数理论值非常适合于射频 微波 4H-SiC MESFET 器件大信号模型的分析。

参考文献

- [1] Clarke R C, Palmour J W. SiC Microwave Power Technologies[J]. Proceeding of IEEE, 2002, 90(6):987-992
- [2] 曹全军, 张义门, 张玉明, 汤晓燕, 吕红亮, 王 悦湖. 4H-SiC MESFET 的新型经验电容模型[J]. 固体 电子学研究与进展, 2008, 28 (1)
- [3] Manohar S, Pham A, Evers N. Development of an Empirical Large Signal Model for SiC MESFETs[C]. 59th ARFTG Conference Digest, 2002:23-29
- [4] 徐跃杭, 徐锐敏, 延波, 王磊. 微波功率 4H-SiC MESFET 小信号等效电路建模研究[J]. 微波学报, 2007, S1
- [5] Xu Y, Xu R, Yan B. Advanced SPICE-modeling of 4H-SiC MESFET [J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2007, 5 (1)
- [6] 徐跃杭, 徐锐敏, 延波. SiC MESFET 大信号建模初步研究[C]. 全国微波毫米波会议, 2005
- [7] 亢宝位.场效应晶体管理论基础[M].北京:科学出版 社, 1985,87
- [8] 王秉中. 计算电磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 333-354

刘 莹 女,1986 年生,研究生。主要研究方向: 宽禁带 半导体器件建模以及微波毫米波电路与系统的研究。 E-mail: liuying0510@yahoo.com.cn