

基于粒子群算法的氮化镓功率晶体管参数提取方法

郑晨焱

华润微电子(重庆)有限公司

摘要: 由于传统方法在氮化镓功率晶体管参数提取中应用效果不佳,参数提取误差较大,本文提出基于粒子群算法的氮化镓功率晶体管参数提取方法。建立氮化镓功率晶体管电路模型,描述氮化镓功率晶体管输出电流,以模拟输出电流与测量电流相对误差最小作为目标建立晶体管参数提取目标函数,利用粒子群算法对目标函数求解,提取到误差最小的氮化镓功率晶体管参数,以此完成基于粒子群算法的氮化镓功率晶体管参数提取。实验证明,设计方法提取参数,与氮化镓功率晶体管参数模拟仿真基本一致,设计方法在氮化镓功率晶体管参数提取方面具有良好的应用前景。

关键词: 粒子群算法; 氮化镓功率晶体管; 参数提取; 相对误差; 目标函数; 模拟仿真

【DOI】10.12252/j.issn.2096-627X.2023.02.116

Parameter extraction method for gallium nitride power transistor based on particle swarm optimization algorithm

Zheng Chenyan

China Resources Microelectronics (Chongqing) Limited Shapingba district of Chongqing

Abstract: Due to the poor performance of traditional methods in parameter extraction of gallium nitride power transistors and the large error in parameter extraction, this paper proposes a parameter extraction method for gallium nitride power transistors based on particle swarm optimization algorithm. Establish a circuit model of gallium nitride power transistor, describe the output current of gallium nitride power transistor, and establish a transistor parameter extraction objective function with the goal of minimizing the relative error between simulated output current and measured current. Use particle swarm optimization algorithm to solve the objective function and extract the gallium nitride power transistor parameter with the smallest error. This completes the gallium nitride power transistor parameter extraction based on particle swarm algorithm. The experiment proves that the design method for extracting parameters is basically consistent with the simulation of gallium nitride power transistor parameters. The design method has good application prospects in extracting gallium nitride power transistor parameters.

Keywords: Particle Swarm Optimization; Gallium nitride power transistor; Parameter extraction; Relative error; Objective function; Simulation

引言

氮化镓功率晶体管具有功率高、可靠性高、成本低等优点,目前已经被广泛应用到航天、汽车、轮船等领域中,其作为半导体芯片的原料,随着电力电子行业的发展,氮化镓功率晶体管发挥着越来越重要的作用。氮化镓功率晶体管具有较高的载流子注入效率,并且其极区掺杂较高,发射极区掺杂较低,不影响器件的电流增益。除此之外,氮化镓功率晶体管电容与电阻比较低,晶体管电流的时间延迟,促使器件工作速度提升。氮化镓功率晶体管相较于其他晶体管制作成本更低,但是材料生长相对困难、晶体管成品率比较低,是目前氮

化镓功率晶体管应用主要面临的难题。近年来,对于氮化镓功率晶体管的研究工作主要集中在氮化镓功率晶体管光学特性方面,对于氮化镓功率晶体管参数提取方面研究比较少。但是对于氮化镓功率晶体管光学、电学等方面特性的研究,离不开对晶体管参数的提取。目前现有的晶体管参数提取方法存在一些不足与缺陷,在实际应用中提取的参数存在较大的误差,达不到氮化镓功率晶体管仿真建模需求,为此提出基于粒子群算法的氮化镓功率晶体管参数提取方法。

一、建立氮化镓功率晶体管模型

在对氮化镓功率晶体管参数提取之前,建立氮化镓

功率晶体管电路模型，模型由两个背靠背的PN结和一个电流源构成，PN结为一侧掺杂成P型氮化镓功率晶体管与另一侧掺杂成N型氮化镓功率晶体管的中间相连接触面，模型中两个PN节由两个并联的氮化镓功率晶体管构成^[1]。氮化镓功率晶体管模型用公式表示为：

$$I_n = \frac{i_o}{f_{ty}} - I_{ui} \quad (1)$$

式中， I_n 表示氮化镓功率晶体管输出电流； I_{io} 表示氮化镓功率晶体管正向集电极电流； $q_{f_{ty}}$ 表示氮化镓功率晶体管软膝效应因子； I_{ui} 表示氮化镓功率晶体管反向发射集电流^[2]。氮化镓功率晶体管正向集与反向集电极电流表达式为：

$$\begin{cases} I_{io} = \frac{I_{rt}}{q_{RY}} \\ I_{ui} = \frac{I_{ir}}{q_{RY}} \end{cases} \quad (2)$$

式中， I_{rt} 表示氮化镓功率晶体管的集电极正向传输饱和电流； q_{RY} 表示归一化基极电荷； I_{ir} 表示氮化镓功率晶体管的集电极反向传输饱和电流^[3]。氮化镓功率晶体管的集电极正向与反向传输饱和电流表达式为：

$$\begin{cases} I_{rt} = I_{cvb} [\exp(q_{RY} V_{rty} / \eta_{ui}) - 1] \\ I_{ir} = I_{sdx} [\exp(q_{RY} V_{wer} / \eta_{nm}) - 1] \end{cases} \quad (3)$$

式中， I_{cvb} 表示氮化镓功率晶体管基极-发射集电流； V_{rty} 表示氮化镓功率晶体管的集电极正向传输饱和电压； η_{ui} 表示理想的氮化镓功率晶体管基极-发射因子； I_{sdx} 表示氮化镓功率晶体管基极-电极集电流； V_{wer} 表示氮化镓功率晶体管的集电极反向传输饱和电压； η_{nm} 表示理想的氮化镓功率晶体管基极-集电极饱和和发射因子^[4]。软膝效应因子用公式表示为：

$$q_{f_{ty}} = \frac{1}{\tan[\alpha]} \quad (4)$$

式中， α 表示拟合系数^[5]。将公式(2)、(3)、(4)代入到公式(1)中，即可描述出氮化镓功率晶体管电路情况，以此完成氮化镓功率晶体管模型建立。

二、设定氮化镓功率晶体管参数提取目标函数

针对提取的氮化镓功率晶体管参数，选择参数相对误差最小值作为目标建立函数，参数相对误差为测量的氮化镓功率晶体管电流值与上文建立的氮化镓功率晶体管模型输出的电流值差值，其用公式表示为：

$$f(x) = \min(I_n - I^*) \quad (5)$$

式中， $f(x)$ 表示氮化镓功率晶体管参数提取目标函数； I^* 表示测量的氮化镓功率晶体管电流值。以上选用相对误差表征氮化镓功率晶体管参数提取的准确程度， $f(x)$ 值越小，表示提取的参数与模拟值拟合程度越好，提取的参数越准确。

三、基于粒子群算法的晶体管参数提取

根据氮化镓功率晶体管参数提取需求，此次选择粒子群算法作为参数提取优化算法，粒子群算法具有全局寻优能力。上文建立的晶体管参数提取目标函数有多个可能解，假设每个目标函数可能解为搜索空间内一个位置节点，粒子通过迭代搜索，寻找到与目标节点距离最近的位置，以此求出相对误差最小的氮化镓功率晶体管参数。根据实际情况，对粒子群算法参数进行初始化，假设初始粒子群体数量为 N ，粒子学习因子为 c ，粒子群体在搜索空间内通过速度和位置更新，确定下一次迭代中粒子搜索方向，粒子移动速度更新公式为：

$$v(i+1) = \omega v_i + ce[d(i) - x_i] + [d_{w_i} - x_i] \quad (6)$$

式中， $v(i+1)$ 表示更新后的粒子移动速度，即下一轮迭代中粒子移动速度； ω 表示粒子惯性权重因子； v_i 表示当前迭代中粒子移动速度； e 表示服从均匀分布的0-10随机整数； $d(i)$ 表示当前迭代中粒子个体搜索最优位置； x_i 表示当前迭代中粒子位置； d_{w_i} 表示粒子群体历史最优位置。根据更新后的粒子移动速度，确定更新后的粒子位置，其用公式表示为：

$$x(i+1) = v(i+1) + x_i \quad (7)$$

式中， $x(i+1)$ 表示更新后的粒子移动位置，即下一轮迭代中粒子移动位置。根据更新后的速度和位置，粒子在空间内进行搜索，搜索过程中通过对粒子交叉和变异操作，产生新的群体，其用公式表示为：

$$\delta = \rho \cdot v(i+1) + \sigma \cdot x(i+1) \quad (8)$$

式中， δ 表示更新后的粒子群体； ρ 表示粒子交叉率； σ 表示粒子变异率。当粒子达到迭代条件时，利用适用度函数对最后一次更新生成的粒子群体适用度计算，适应度可以反映出粒子搜索位置与目标位置的相符程度，数值越大，表示搜索位置与目标位置越相符，其计算公式为：

$$r = \frac{\sum(x_\delta - x_\rho)}{\sum(x_\delta + x_\rho)} \quad (9)$$

式中， r 表示粒子适应度值； x_δ 表示更新后的粒子对应的位置； x_ρ 表示目标位置。输出 r 值最大的粒子，其对应的参数为相对误差最小的氮化镓功率晶体管参数，以此提取到晶体管参数，进而完成基于粒子群算法

的氮化镓功率晶体管参数提取。

四、实验论证

(一) 实验准备与设计

利用KHFH电路仿真工具对氮化镓功率晶体管电路模型进行模拟仿真，将仿真氮化镓功率晶体管电路参数与提取参数比对，以此验证设计方法是否具有氮化镓功率晶体管参数提取功能。按照上述流程建立氮化镓功率晶体管电路模型，用于氮化镓功率晶体管电路参数提取目标函数求解的粒子群算法参数设定如下：群体数量为200，学习因子设置为0.15，初始惯性权重因子设置为0.01，变异率与交叉率分别设置为2.15%、3.42%。通过对目标函数求解，提取到氮化镓功率晶体管参数如下表所示。

表1 提取参数表

序号	参数	提取
(1)	正向传输饱和电流	9.16
(2)	发射集反向传输饱和电流	5.62
(3)	正向集电极电流理想因子	1.25
(4)	拟合系数	0.16
(5)	非理想基极-发射因子	0.36
(6)	非理想基极-发射极电流	5.69
(7)	理想基集-集电极饱和电流	4.15
(8)	理想基集-集电极饱和电流发射因子	1.05
(9)	非理想的基集-集电饱和电流	6.25
(10)	非理想的基集-集电饱和电流发射因子	1.75

利用KHFH对模型仿真，KHFH是一个功能全面的电路模拟仿真软件，能够对晶体管数字电路进行模拟仿真分析，在KHFH中进行相应的仿真设置，得到氮化镓功率晶体管特性曲线。

(二) 实验结果与讨论

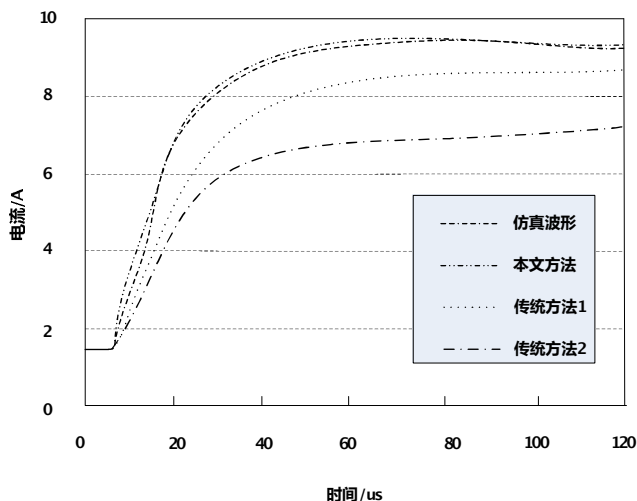


图1 氮化镓功率晶体管电路特性曲线对比图

氮化镓功率晶体管参数可以通过氮化镓功率晶体管电路曲线表现出来，根据提取的参数绘制电路特性曲线，同时选择目前现行的参数提取方法（传统方法1、传统方法2），将三种方法提取参数特性曲线与模拟曲线比对，得到如下图所示的氮化镓功率晶体管电路特性曲线。

通过对图1中四条氮化镓功率晶体管电路特性曲线对比可知：本文方法提取参数得到的氮化镓功率晶体管电路特性曲线与模拟仿真在输出电流能力上基本一致，与传统方法1与传统方法2相比，在氮化镓功率晶体管电流方面误差最小，验证了本文所提方法在氮化镓功率晶体管参数提取方面的可行性。

五、结束语

氮化镓功率晶体管是半导体芯片重要原料之一，参数作为氮化镓功率晶体管模型重要部分，对其精准、快速提取具有重要的意义。此次结合粒子群算法优势，针对现行方法的不足与缺陷，参考相关文献资料，将其应用到氮化镓功率晶体管参数提取中，设计一种新的提取方法，通过与模拟仿真晶体管参数比对，检验了研究方法的可行性与可靠性，有效提高了氮化镓功率晶体管参数提取精度，为氮化镓功率晶体管参数提取提供了理论支撑，虽然此次研究取得了一定的研究成果，但是仍有些地方需要进一步探讨，今后会在该方面展开深层次研究，促进氮化镓功率晶体管在半导体芯片领域广泛应用。

参考文献

[1] 李文龙, 陶洪琪, 余旭明. X波段氮化镓高效率功率放大器MMIC[J]. 通信电源技术, 2022, 39(9): 13-15.

[2] 余建树, 李朝霞, 龚雪娇, 王雅宁, 朱坤琳, 杨德昌. 基于并行粒子群算法的电力系统分区抗差状态估计[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3139-3148.

[3] 张子同, 姜岩峰. 高频硅基光电晶体管SPICE模型的建立及关键参数的提取[J]. 电子学报, 2021, 49(08): 1645-1652.

[4] 蔡海怡, 翟丽荔, 何俊艺, 等. 高精度GaAs PHEMT小信号模型参数提取[J]. 现代工业经济和信息化, 2021, 11(05): 63-64+93.

[5] 方春恩, 曾春燕, 薛涛, 等. 基于混沌粒子群算法的IGBT参数提取研究[J]. 电力电子技术, 2020, 54(07): 133-135+140.