

# GaAs MESFET 准二维动态大信号模型

王 静, 邓先灿

(杭州电子工业学院 CAE 所, 杭州 310037)

**摘 要:** 本文运用电荷控制分析方法, 提出了 GaAs MESFET 以电荷源为基本组成元件的大信号非线性动态模型. 该模型在解决了电荷不守恒问题以及 DC 与 RF 电流不一致性问题的同时, 结合器件的温度特性与自升温效应, 实现了 GaAs MESFET 的准二维大信号动态分析.

**关键词:** 大信号模型; 电荷控制法; 自升温效应; 准二维分析

**中图分类号:** TN432 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 08-0143-03

## Quasi-Two-Dimensional Dynamic Large-signal GaAs MESFET Model

WANG Jing, DENG Xian-can

(CAE Center of Hangzhou Institute of Electronics Engineering, Hangzhou, 310037, China)

**Abstract:** This paper presents a nonlinear dynamic large-signal model for GaAs MESFETs with charge sources as elements by way of charge-control methodology. Besides solving the problems of charge non-conservation and current non-consistency under DC and RF conditions, the model realizes the quasi-two-dimensional dynamic analysis considering the temperature characteristics and self-heating effect.

**Key words:** large-signal model; charge-control methodology; self-heating effect; quasi-two-dimensional analysis

### 1 引言

GaAs MESFET 的器件模型大致可分为经验模型和物理模型两类, 经验模型是建立在实验数据基础上, 不涉及器件内部结构与特点, 而物理模型则建立在器件基本控制方程基础上, 物理模型能够给出模型参数与器件的几何结构、工艺、物理参数间的关系. 在微波电路 CAD 中, 物理模型越来越受到重视. GaAs MESFET 大信号模型的研究已取得了许多成果, 但在一些物理模型中普遍存在着电荷不守恒问题, 这在一定程度上影响了模型分析的准确性.

本文从解决器件模型的电荷不守恒问题出发, 建立了以电荷源为基本组成元件的大信号非线性动态模型, 该模型适用于微波功率电路 CAD 的设计.

### 2 电荷不守恒问题

准确的 C-V 模型对高速数字电路与模拟电路非常关键, 目前一些 MESFET CAD 采用的电容模型是建立在简化的电荷非守恒技术上, 有可能产生电荷不守恒现象. 对通用的 MESFET 小信号等效电路模型, 以栅极上电荷为例, 其表达式可以写为:

$$Q_G = Q_G(t_2) - Q_G(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} i_G dt \quad (1)$$

如果  $t_1, t_2$  时刻器件处于相同的状态, 则在准静态模拟下, 栅极上电荷的静增量应为零, 但在实际的分析过程中, 往往不能

保证这一点, 这就引起了电荷不守恒, 其主要原因有二: 一是器件模型作一定程度的近似, 元件的表述不是很准确; 二是在模型分析过程中, 采用的数学方法引入了一定误差. 按照公式(1), 导致栅极电荷不守恒的原因是栅极电流有直流分量, 这由于  $C_{gs}$ 、 $C_{gd}$  的表达式未从相同的电荷公式中推导, 或采用了简化形式的缘故. 在正常情况下, 流过  $C_{gs}$ 、 $C_{gd}$  各自有一直流分量, 两者相互抵消, 栅极电流表达式无直流分量. 因此, 模型中本征电荷元件的描述是非常关键的, 如果采用电荷控制法大信号模型, 以电荷源作为模型的基本元件, 就可以避免上述情况的发生, 解决电荷不守恒问题.

### 3 MESFET 电荷控制法

电荷控制法基本思想是通过分析沟道电荷的变化情况来描述器件端口的电流特性. 目前已经有较统一的作为模型基本元件的电荷源定义, 即栅极电荷源  $Q_G$ 、漏极电荷源  $Q_D$ 、源极电荷源  $Q_S$ <sup>[1]</sup>. 为保证各端口总电流守恒, 应当有  $Q_G + Q_S + Q_D = 0$ . 否则在 RF 条件下三端口的电流之和不为零, 就可能导致 RF 与 DC 下等效电路模型的不一致性.

由沟道电流连续性方程及传输电流方程可以推导出漏极、源极电流表达式, 以  $I_{ch}(t)$  表示沟道内的直流电流, 可写出漏极电流:

$$\text{源极电流: } i_D(t) = -I_{ch}(t) - (dQ_D/dt)$$

由电流连续性要求,栅极电流:  $i_G(t) = i_S(t) - i_D(t) = (dQ_G/dt)$

其中,栅、漏、源电荷源  $Q_G$ 、 $Q_D$ 、 $Q_S$  各为:

$$Q_G = - \int_0^{L_G} q_g dx, Q_D = (1/L_G) \int_0^{L_G} x q_g dx, Q_S = (1/L_G) \int_0^{L_G} (L_G - x) q_g dx$$

其中,  $q_g$  为栅单位长度的电荷密度:  $q_g = qN_D Z a (W/W_0)^{1/2}$

上面表达式中  $N_D$  为载流子浓度,  $Z$  为沟道宽度,  $W_0$  为夹断电压,  $a$  为沟道深度,  $W$  为沟道内某点的电势,在源极处  $W_S = V_{bi} - V_{gs}$ ,在漏极处  $W_D = V_{bi} - V_{gs} + V_{ds}$ ,  $V_{bi}$  为自建势。

对实际器件进行二维分析,计算过程过于复杂,不适用于 CAD 模拟,作准二维近似分析,可以降低模拟时间,同时基本上不影响分析结果的准确性。假设 MESFET 内部沟道电场只有沿  $x$  方向的分量,空间电荷区完全耗尽,沿  $x$  方向把沟道离散化,可写出:

泊松方程:  $(E_x - E_{x-1})/x = q/(r_0)(N_D - n_x)$ ,  $E_x$  为电场,  $n_x$  为电子密度

电流传输方程:  $I_{DS} = qZY_x n_x v_x$ , 式中  $v_x$  为电子速率,  $Y_x$  为沟道厚度。

对亚微米栅长器件,考虑非稳态载流子传输效应,则有能量方程:  $(w_x - w_{x-1})/x = qE_{x-1} - ((w_x - w_0)/(v_{x-1}w(w)))$

动量方程:  $(v_x - v_{x-1})/x = (qE_x)/(v_x m^*(w)) - (1/p(w))$   
 $w$  为电子能量,  $m^*(w)$  为电子有效质量,  $p(w)$ ,  $w(w)$  分别为电子动量与能量弛豫时间,漏源电压可以写为:  $V_{DS}$

$$= \sum_{i=1}^M E_x dx = \sum_{i=1}^M (E_i + E_{i-1}) x/2, \text{ 式中 } M \text{ 为离散点的数目。}$$

通过上述方程的迭代求解,可以求出器件沟道内电场的分布情况及载流子的速率,以及各个离散点耗尽层的深度,并获得沟道电荷的表达式。

#### 4 大信号电荷源模型

GaAs MESFET 在大信号下,沟道温度由于功耗产生的热量会有明显的上升,目前常见的大信号模型中,少有考虑自升温效应的研究报道。器件内部温度的具体分布情况相当复杂,在 CAD 模型中,考虑沟道的平均自升温幅度基本可以满足要求。记沟道的平均温度为  $T$ ,环境温度  $T_0$ ,自升温的幅度  $T$  可以表示为:  $T = P_{diss}/((T_0)W) \ln(8t_{sub}/L)$   
 式中,  $P_{diss}$  为器件的耗散功率,  $T_0$  为环境温度,  $(T_0)$  为芯片在  $T_0$  温度下的热导率,  $t_{sub}$  为衬底厚度,  $W$  为栅宽、 $L$  为栅长,在本模型中,主要分析阈值电压  $V_T$ 、自建势  $V_{bi}$  及载流子迁移率  $\mu$  受自升温效应的影响。它们随温度变化的关系如下<sup>[2]</sup>:  
 $V_T = V_{T0} - K_{VT} T$ ,  $V_{bi} = V_{bi0} - K_{bi} T$ ,  $\mu = \mu_0/(1 + T/T_0)$ ,  
 $V_{T0}$ ,  $V_{bi0}$ ,  $\mu_0$  为阈值电压、自建势、迁移率在  $T_0$  下的值,  $K_{VT}$ ,  $K_{bi}$  为阈值电压、自建势的温度系数。

MESFET 工作在大信号时,栅极上的肖特基势垒可能进入正向导通或反向击穿状态。按照一般 CAD 的分析方法,用两个并联二极管  $D_{gs}$ ,  $D_{gd}$  来描述栅源、栅漏的特性。

大信号电荷源等效电路,还包括栅、源、漏端的接触电阻、引线电感与引线电容等寄生参量。电荷源大信号等效电路如图 1 所示,  $Q_g$  与  $Q_d$  为电荷源,  $C_{gs}$ ,  $C_{gd}$ ,  $C_{ds}$  为栅源、栅漏、漏源电容,  $L_s$ ,  $R_s$ ,  $L_g$ ,  $R_g$ ,  $L_d$ ,  $R_d$ ,  $C_{in}$ ,  $C_{out}$  均为寄生参量。

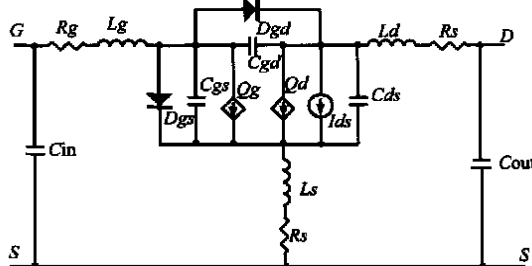


图 1 大信号电荷源等效电路

#### 5 大信号电荷源模型的准动态分析

器件工作频率较高时,载流子的瞬态效应比较显著,采用动态分析。在 MESFET 实际情况中,由沟道电流分量引起的瞬态效应与由电荷源引起的瞬态效应相比可以忽略,电荷源与时间相关的表达式为:  $Q(t) = Q_0(t) - q(dQ(t)/dt) - Q_0(t - q)$ ,

$q$  为载流子的弛豫时间常数,  $Q_0$  为稳态电荷栅极电荷、漏极电荷可以表示为:

$$Q_G(t) = Q_{G0}(V_{gs}(t - g), V_{ds}(t - d)), Q_D(t) = Q_{D0}(V_{gs}(t - g), V_{ds}(t - d)),$$

$g, d$  为相对于  $V_{gs}$ ,  $V_{ds}$  的弛豫时间。

#### 6 电荷源模型的应用

将上述电荷源大信号模型运用于微波 CAD,本文运用 HB 方法进行电路分析。流过电荷源的电流表达式中没有直流分量,解决了电容控制电路中所存在的电荷不守恒问题。对具体的 MESFET 按照上述方法进行准动态模拟分析,器件主要参数:  $L_G = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $L_{SG} = 0.25 \mu\text{m}$ ,  $L_{GD} = 1.5 \mu\text{m}$ ,  $Z = 220 \mu\text{m}$ ,  $V_{bi} = 2.73 \text{V}$ ,  $N_D = 2.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 。模型中考虑了自升温效应后,模拟结果与实际情况更符合,图 2 为工作频率 7GHz,器件功率增益的模拟结果与测量结果的比较。本模型运用于微波单片放大电路设计,器件参数同上,工作频率范围 14~18GHz,直流偏置点为 ( $V_{gs} = -1.0 \text{V}$ ,  $V_{ds} = 7.0 \text{V}$ ),首先进行直流分析,以确定外加的寄生参量,建立器件大信号模型,然后根据放大器的电路拓扑与元件参数,模拟分析放大器的功率增益、功率附加效率等特性。图 3 为 16GHz 频率点功率转换特性曲线,模拟结

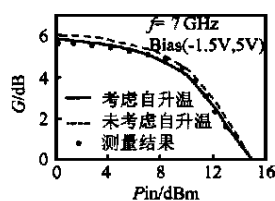


图 2 功率增益模拟与测量结果比较

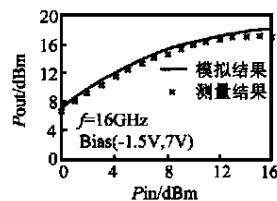


图 3 功率转换特性模拟与测量结果比较

果与测量值(文献结果[3])符合比较好.

## 7 结论

本文从解决器件模型的电荷不守恒问题出发,采用电荷控制分析方法,推导作为模型基本元件的栅极、漏极、源极电荷源的表达式,采用准二维分析的方法,结合器件温度效应与自升温效应,建立电荷控制法大信号非线性动态模型;经过MMIC放大器设计应用,表明模型适合于微波电路CAD.

## 参考文献:

- [1] Muhammad N., Tor A. F. A new charge conserving capacitance model for GaAs MESFET [J]. IEEE Trans. Electron Devices, 1997, ED-44 (11): 1813 - 1821.
- [2] Philip C. Canfield, Steven C. F., David J. Allstot. Modeling of frequency and temperature effects in GaAs MESFETs [J]. IEEE Jour. of Solid-state Circuits, 1990, 25 (1): 299 - 306.
- [3] Trond Ytterdal, Byung-Jong Moon, Tor A. Fjeldly. Enhanced GaAs MESFET CAD model for a wide Range of Temperatures [J]. IEEE Trans. Electron Devices, 1995, 42 (10): 1724 - 1734.

## 作者简介:



王 静 1972年生,1993年毕业于合肥工业大学应用物理系,1996获杭州电子工业学院硕士学位,目前从事 GaAs MESFET 器件模型研究及 MMIC CAD 设计工作.



邓先灿 1955年毕业于吉林大学物理系,1956年参加了中国第一只晶体管的研制,随后从事锗、硅和砷化镓系列器件的研究,GaAs 单片微波和超高速集成电路的研究,近年来主要从事砷化镓器件模型及大规模集成电路 VLSI 及 ASIC CAE 教学与科研工作,现任微电子学教授,博士生导师.

2000 年第 8 期 Acta Electronica Sinica No. 8 2000

# 电子学报

(总期 197 期) (Monthly) (Series No. 197)

主办单位 中国电子学会  
协办单位 中国计算机报社  
编辑 《电子学报》编辑委员会  
主编 王 守 觉  
总编辑 刘 力  
通信处 北 京 1 6 5 信 箱  
(邮政编码 100036)  
电 话 (010)68285082  
传 真 (010)68173796  
排版印刷 中国纺织印刷厂  
国内总发行 北京市报刊发行局

Published by the Chinese Institute of Electronics, Beijing  
China Infoworld  
Edited by Editorial Board of Acta Electronica Sinica  
Chief Editor: Wang Shoujue  
Director: Liu Li  
Editorial Office of Acta Electronica Sinica (P.O. Box 165, Beijing 100036, China)  
Tel 86-10-68285082  
Fax 86-10-68173796  
Printed by Textile Printinghouse, China  
Distributed by  
Domestic: Beijing Baokan Faxingju, China  
Foreign: China International Book Trading Corporation  
Subscription Office — All Local Post Offices in China

国外总发行 中国国际图书贸易总公司  
国内订购处 全 国 各 邮 电 局

刊号: ISSN 0372-2112  
CN11-2087/TN

邮发代号(国内/国外): 2-891/M436