

高压功率集成电路的混合模拟

张 翔¹ 李肇基² 杨之廉¹

(1 清华大学微电子所, 北京 100084)

(2 电子科技大学微电子所, 成都 610054)

摘要: 提出了高压功率器件统一网络模型, 并在 SPICE3 和 PISCES2B 的基础上, 利用两级牛顿迭代法, 开发了高压功率集成电路的电路——器件混合模拟软件。利用该软件对一个高压 LD-MOS 开关电路进行了混合模拟。通过该种模式的模拟, 能直接分析器件参数对电路性能的影响, 为高压功率集成电路的设计提供了方便。

关键词: 功率集成电路; 网络模型; 混合模拟

EEACC: 2560B; 2560R

中图分类号: TN402 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2000)10-1005-05

Mixed-Mode Simulation of High Voltage and Power IC

ZHANG Min¹, LI Zhao-jí² and YANG Zhi-lian³

(1 Institute of Microelectronics of Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2 Research Institute of Microelectronics, University of Electronic and Science of China, Chengdu 610054, China)

Received 26 August 1999, revised manuscript received 10 January 2000

Abstract: A unified net model of high voltage and power device is presented. Using the two-level Newton algorithm a circuit-device mixed-model simulator of high voltage and power IC is developed based on SPICE3 and PISCES2B, with which the mixed-mode simulation of high voltage LD-MOS switcher is performed. It can directly probe the influence of the power device parameters on the circuits performance and facilitate the design of high voltage and power IC with this method.

Key words: power IC; net model; mixed-mode simulation

EEACC: 2560B; 2560R

Article ID: 0253-4177(2000)10-1005-05

张 翔 男, 博士后, 主要从事高压功率器件及集成电路 CAD 研究工作。

李肇基 男, 博士生导师, 主要从事高压功率器件及集成电路 CAD 研究工作。

杨之廉 男, 博士生导师, 主要从事半导体器件及集成电路 CAD 研究工作。

1999-08-26 收到, 2000-01-10 定稿

1 前言

随着高压功率集成电路的飞速发展,人们已清楚地认识到在工艺模拟、器件模拟、电路模型以及版图设计等方面,功率集成电路的 CAD 技术与传统的 VLSI CAD 技术有较大的差别^[1,2]. 在功率器件模型方面,目前通用的电路模拟软件一般只包含有限的解析器件模型,如双极晶体管、MOS 晶体管模型等,而对于含有 LDMOS、LIGBT 等功率器件的功率集成电路,了解电路中起关键作用的功率器件特性对电路设计有重要意义,而通用电路模拟软件却没提供这些功能. 器件模拟软件能在特定的电压或电流边界条件下对 LDMOS、LIGBT 功率器件进行分析,无法获得在真实电路中动态边界条件下器件的工作特性,因此需要将电路模拟软件和器件模拟软件连接起来,实现对功率集成电路的混合模拟. 在模拟过程中,对功率集成电路中的高压功率器件采用基于泊松方程、连续性方程的二维数值模型,对其它元器件采用电路模拟软件中的解析模型.

2 高压功率集成电路混合模拟方法

在电路-器件混合模拟中,常用的方法有全耦合的牛顿法^[3]及非耦合的二级牛顿法^[4].

全耦合法的基本思想是将描述电路的 Kirchhoff 电流方程和描述器件的半导体基本方程(泊松方程、电子和空穴连续性方程、电流密度方程)作为一个耦合的方程组,利用牛顿拉夫森法求解^[4]. 在没有和数值器件相连的节点处,采用电路模拟中改进的节点法得到 Kirchhoff 电流方程,在和数值器件连接的节点处,Kirchhoff 方程中的电流需加上器件的电子电流、空穴电流和位移电流. 图 1 给出了全耦合牛顿法的原理图. 节点 1 处是器件和电路的连接点,该点的 Kirchhoff 方程必须包含电路和器件的所有变量,其方程为:

$$G_1(V_2 - V_1) - I_1 + h_1 J_{ea} + h_2 J_{cb} + h_3 J_{cd} + h_4 J_{ee} = 0 \quad (1)$$

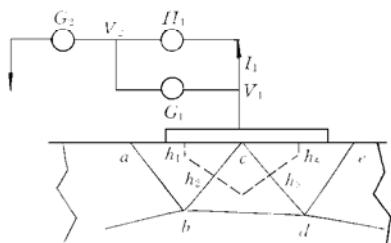
图 1 全耦合混合模拟法原理图

FIG. 1 Principle of Mixed Mode Simulation with Full Conjunction

组,其变量为节点的电压和数值器件网格点上的电势、电子和空穴浓度,利用牛顿法可直接求解出电路中各节点电压.

电路-器件二级牛顿混合模拟的基本原理是^[5]:求解电路节点方程,得到各节点电压初始值,通过接口程序将数值型器件各终端电压值传递给器件模拟软件. 器件模拟软件通过求解泊松方程、电子和空穴连续性方程求出该器件各终端电流及导纳矩阵,利用接口程序回传给电路模拟软件,继续求解节点方程,直到收敛为止.

在功率集成电路的电路-器件混合模拟中,数值型器件模块和其它已有的各种解析模块(MOSFET、BJT)相似. 不同的是解析模块是通过器件等效电路利用解析模型求出其导纳矩阵和终端电流. 而数值型器件模块则是通过器件模拟软件求解泊松方程、电子和空穴连续性方程得到终端电学特性. 因此需要额外开发一个接口程序,完成电路模拟软件和器件模拟软件之间相互通信,实现将数值型器件终端电压传递给器件模拟软件以及将器件模拟软件所求得的终端电流值及导纳矩阵传递给电路模拟程序. 图 2 为两级牛顿混合模拟方法的原理图. 其具体迭代过程为:首先确定电路模拟软件本次迭代所需的电压边界条件、时间步长或者频率;根据电路分析类型产生器件模拟软件的输入文件;通过一定的网络协议在本地机或者远程



计算机上进行数值器件的数值模拟; 电路模拟软件通过接口程序获得数值型器件模拟结果, 并填充电路模拟所需的导纳矩阵和右端电流向量, 进行迭代。重复上述步骤, 直到收敛为止。

两级牛顿迭代法直流分析时如果节点电压未知, 该算法收敛很快, 而全牛顿法需指定节点电压, 否则不会收敛; 其次两级牛顿算法的模块化使得在混合模拟时可以选用不同的器件模拟软件; 该算法可以很容易地利用并行算法将每个数值器件分配到不同的机器上进行数值模拟^[6], 所以我们采用两级牛顿迭代法来实现高压功率集成电路的电路-器件混合模拟。

3 高压功率器件统一的网络模型

众所周知, 电路分析程序是将各种半导体器件建立一等效电路, 根据等效电路, 利用各种解析模型求

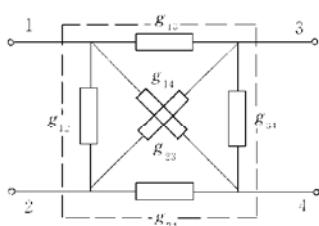


图3 器件数值网络模型示意图
FIG. 3 Numerical Net-Mode for Device

出其导纳矩阵。而对于数值型高压功率器件, 我们不知道其具体类型, 甚至不清楚其电学特性, 因此我们将其看作一个黑箱。以一个四端器件为例, 其网络模型如图3所示。对于n端的高压功率器件, 其等效网络模型节点方程的矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1n} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2n} \\ \cdots & & & \\ g_{n1} & g_{n2} & \cdots & g_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$g_{ii} = - \sum_{j=1}^n g_{ij} (j \neq i) \quad (3)$$

将该数值型器件模型的导纳矩阵填入电路模拟软件中的电路导纳矩阵, 便可实现高压功率集成电路的混合模拟。

数值模拟软件能求解电流、电压、电场及载流子的浓度等电学参量, 一般不能直接求出导纳矩阵。根据导纳的定义:

$$g_{ij} = \left. \frac{\Delta I_i}{\Delta V_j} \right|_{V_1, V_2, \dots, V_{j-1}, V_{j+1}, \dots, V_n} \quad (4)$$

我们可以利用器件模拟软件在解得某一固定偏置点之后, 分别在每个电极上增加一电压微扰量 ΔV , 而其余电极电压保持不变, 用(4)式求出其导纳矩阵。由(4)式可知, 对有n个终端的高压功率器件, 求解某一个偏置点的导纳矩阵, 实际上需要求解n+1个偏置点, 而高压功率器件的单元尺寸一般比较大, 进行数值模拟时所采用的格点较多, 因此所需模拟时间较长。而实际上在器件模拟软件中, 每个电极上所加的电压并非以电路中的零点为参考点, 而是以该器件的某个电极为相对零点, 假设以第n个电极为参考点, 以($V_i - V_n$)为变量, 方程(2)将减少为n-1个方程:

$$\begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1(n-1)} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2(n-1)} \\ \cdots & & & \\ g_{(n-1)1} & g_{(n-1)2} & \cdots & g_{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 - V_n \\ V_2 - V_n \\ \vdots \\ V_{n-1} - V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{n-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

由(3)式有:

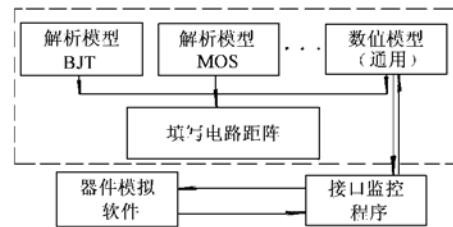


图2 两级牛顿混合模拟法原理图

FIG. 2 Principle of 2-Stage Newton
Mixed-Mode Simulation

$$g_{in} = - \sum_{j=1}^{n-1} g_{ij} \quad (6)$$

由(2)式, 根据 Kirchhoff 定律可得:

$$g_{nj} = \sum_{i=1}^{n-1} g_{ij} \quad (7)$$

由(6)、(7)式有:

$$g_{nn} = - \sum_{j=1}^{n-1} g_{nj} = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} g_{ij} \quad (8)$$

对有 n 个终端的高压功率器件, 我们只需对前面 $n-1$ 个电极增加电压微扰量, 求解 $n-1$ 阶导纳矩阵 $g_{(n-1), (n-1)}$, 利用(6)、(7)、(8)式, 可求出 n 阶导纳矩阵 $g_{n,n}$. 将其填入电路模拟软件的电路矩阵, 进行电路分析, 减少高压功率器件最后一个电极偏置点的数值求解, 加快了求解速度.

4 高压 LDMOS 开关电路的混合模拟

根据以上方法, 我们在 SPICE3 和 PISCES2B 的基础上, 开发了高压功率集成电路的混合模拟软件,

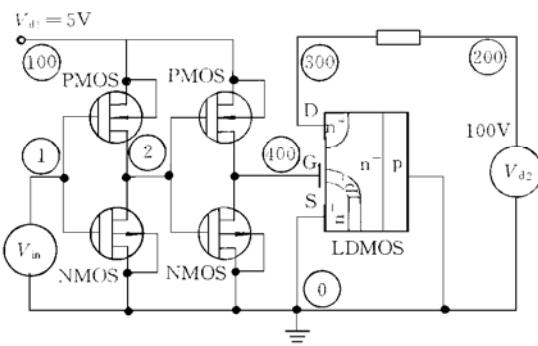


图 4 高压 LDMOS 开关电路

FIG. 4 Switch Circuit with High Voltage LDMOST

DELT V1= 0.0001 DELT V2= 0.0001 DELT V3= 0.0001

其中 Nxxxxx 语句卡是新增加的元件卡, 关键字为 'N' 代表该元件为数值型器件, NLDMOS1 说明了高压 LDMOS 在电路中的连接节点, 节点 300、400、0、0 分别为 LDMOS 的漏、栅、源、衬底电极, 它们对应于器件在数值模拟时的 1、2、3、4 电极, WIDE 说明了 LDMOS 的沟道宽度为 $1000\mu\text{m}$, HOST = pro- 200 则指定了对高压 LDMOS 进行数值模拟的主机名.

MODEL 卡说明了高压 LDMOS 的模型参数, 其中 PISC2 说明了该器件数值模拟软件为 PISCES2B, NODES 说明其电极数为 4, DELTVN 是为了加快模拟速度增加的一个参数, 在相临的两次电路迭代中, 当数值型器件第 N 个电极上的电压变化相对值小于 DELTVN 时, 电路将利用上次器件模拟软件得到的电流及导纳矩阵继续求解, 减少了调用器件模拟的次数, 加快了模拟速度.

图 5 为高压 LDMOS 数值模拟时所采用的

```
NLDMOS1 300 400 0 0 LDMOS WIDE=
1000μm HOST = pro- 200
.MODEL LDMOS PISC2 NODES = 4
```

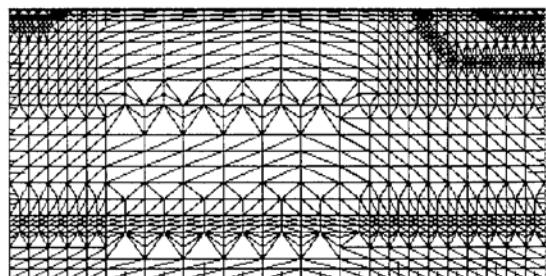


图 5 高压 LDMOS 的网格图

FIG. 5 Net-Grid for High Voltage LDMOST

网格, 其中漂移区长度为 $40\mu\text{m}$, 浓度为 $1\times 10^{14}/\text{cm}^3$, P 型衬底浓度为 $1\times 10^{15}/\text{cm}^3$, 沟道 P⁻浓度为 $1\times 10^{16}/\text{cm}^3$, 源、漏区 N⁺浓度为 $1\times 10^{20}/\text{cm}^3$. 图 6 为低压控制电路部分的输入及输出波形, 其输入为一分段线性源, 通过两级倒相器整形之后, 使得高压 LDMOS 的输入栅电压近似为矩形脉冲. 图 7 为高压 LDMOS 的输出波形, 在 LDMOS 外延层浓度为 $1\times 10^{14}/\text{cm}^3$ 时, 其正向压降为 3V, 当外延层浓度为 $1\times 10^{15}/\text{cm}^3$ 时, 其压降仅为 0.5V.

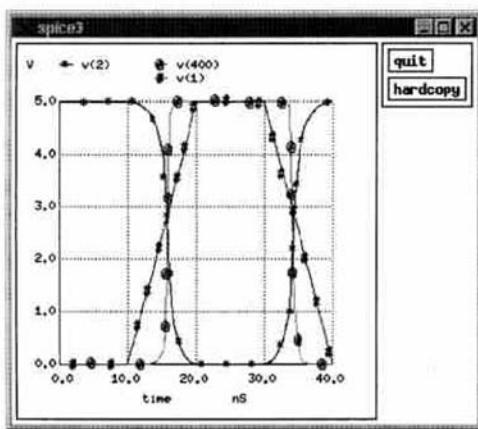


图 6 低压 CMOS 控制电路波形

FIG. 6 Waveform of Control Circuit
for Low-Voltage CMOS IC

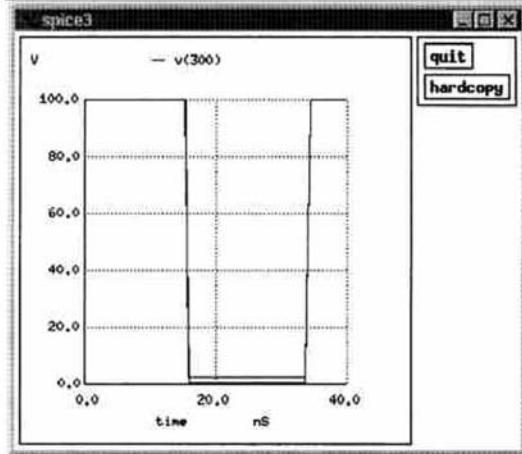


图 7 高压 LDMOS 输出波形

FIG. 7 Output Waveform of High-Voltage
LDMOST

5 结论

为了模拟高压功率集成电路, 我们开发了基于 SPICE3 和 PISCES2B 的电路-器件混合模拟软件, 解决了普通电路模拟软件中功率器件模型的不足, 同时也弥补了器件模拟软件静态边界条件的缺陷. 利用该混合模拟器, 以一个高压 LDMOS 开关电路为例, 实现了对高压功率集成电路的直接模拟.

参 考 文 献

- [1] 张 翊, 李肇基, 半导体学报, 1999, 20(4): 298—302 [ZHANG Min and LI Zhaoji, Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(4), 298—302(in Chinese)].
- [2] 张 翊, 李肇基, 半导体学报, 1999, 20(8): 694—697 [ZHANG Min and Li Zhaoji, Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(8): 694—697(in Chinese)].
- [3] K. Maryaram and D. O. Pejerson, “CODECS: A Mixed-Level Circuit Simulator”, in IEEE Int. Conf. Computer-Aided Design (Santa Clara, CA), 1988, 112—115.
- [4] J. G. Rollins and J. Choma, IEEE Trans. CAD, 1988, 7(8): 862—867.
- [5] K. Maryaram and D. O. Pederson, IEEE Trans. CAD, 1992, 11(8): 1003—1012.
- [6] Z. Yu, R. W. Dutton, “PISCES-2ET and Its Application Subsystems”, Stanford University, California 94305, 1994.