

# 适合于 PSPICE 的一种精确的功率 MOSFET 等效电路

周宝霞 陈治明 王守觉\*

(西安理工大学自动化工程系 西安 710048)

(\* 中国科学院半导体研究所 北京 100083)

**摘要** 建立了一种新的功率 MOSFET 等效电路,以便利用先进的电路模拟软件 PSPICE 对功率 MOSFET 所有特性进行模拟和分析.对 IR 公司的各类 HEXFET 进行的模拟结果与其数据手册中的实验曲线十分吻合,表明该模型具有较高的精确性.

EEACC: 2560B, 2560R

## 1 引言

随着电力电子技术进一步向高频的大功率用电领域发展,功率 MOSFET 在各种电力半导体器件中的重要地位日益显著,使用功率 MOSFET 的电力电子电路日益增多.为了适应电力电子装置和系统的设计人员对包含有功率 MOSFET 的电力电子电路进行计算机辅助设计的需要,有必要首先建立能准确而方便地模拟各种功率 MOS 器件特性的模型. SPICE 是一个个非常著名、用户最多的电路模拟软件包,它有三种内建 MOSFET 器件模型<sup>[1]</sup>,但这些模型无一适合于功率 MOSFET.这是因为 SPICE 的应用目标主要是大规模集成电路,在大规模集成电路中只使用小功率的横向 MOSFET.功率 MOSFET 的源、漏电极不在同一平面内,称为纵向 MOSFET (VMOS).这种结构具有很多不同于横向 MOSFET 的特点,譬如不可避免地存在有一个寄生二极管和一个寄生结型场效应管 (JFET),如图 1 (a)所示.同时,其内部电容随偏置条件的改变以及漏、源电极的电感对器件动态特性的影响等,也无法用 SPICE 的内建 MOSFET 模型进行准确的描述.在借用 SPICE 软件包进行包含有功率 MOSFET 的电力电子电路的计算机辅助设计时,必须首先建立能准确描述所用功率 MOS 器件的工作状态的等效子电路,而且,这些等效子电路中的所有元件必须都是 SPICE 软件包中的内设元件. M. Anderson 及其同事<sup>[2]</sup>针对电子镇流器电路的特殊情况,建

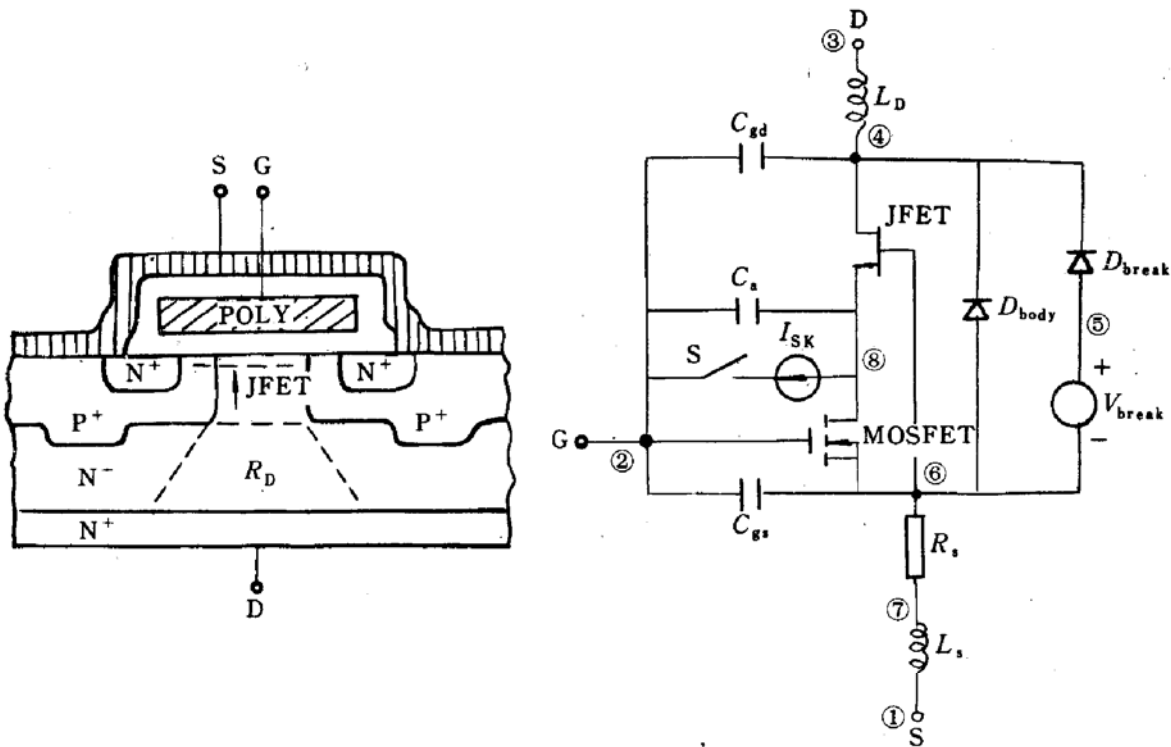
周宝霞 女,1966 年生,博士研究生

陈治明 男,1945 年生,教授,博士生导师,从事半导体器件与半导体材料物理等领域的研究与教学工作

王守觉 男,中国科学院院士

1994 年 11 月 29 日收到初稿,1995 年 3 月 3 日收到修改稿

立了一种比较简单的功率 MOSFET 等效电子电路. 该电路的组成除了必要的电阻和电容而外, 作为有源元件只使用了一个改进的 SPICE 内设 N 沟道 MOSFET<sup>[3]</sup> 和一个反并联二极管. C. F. Wheatly 及其同事<sup>[4]</sup> 则建立了一个比较复杂的等效子电路来模拟普遍应用中的功率 MOSFET 的特性. 该电路所用的有源元件除了一个 MOSFET 和一个反并联二极管, 还有另外两个二极管和一个 JFET, 其无源元件中还针对源电极的电感量引入了一个源极电感. 我们这里先介绍一种结构比 Wheatly 模型略为简单的功率 MOSFET 等效子电路, (如图 1(b) 所示), 然后介绍利用 PSPICE 软件包模拟用这种等效电路表示的功率 MOSFET 时各有关参数的提取办法. 作为一个实例, 我们列举了用这种模型和办法模拟市售器件 HEXFET IRL530 工作特性的一些主要结果, 与生产这种器件的 IR 公司的产品数据手册上的相应曲线<sup>[5]</sup> 相比, 发现令人满意的一致.



(a) 剖面图

(b) 等效电路图

图 1 功率 MOSFET 剖面图及等效电路图

## 2 模型的建立

建模的基本思想是把功率 MOSFET 看作一个由横向 MOSFET 驱动的纵向 JFET 器件. 横向 MOSFET 和纵向 JFET 都可由标准的 PSPICE 软件包来模拟. 横向 MOSFET 反映功率 MOSFET 的栅驱动特性, 利用 JFET 可模拟其电流电压特性. 由于电荷存储效应对功率 MOSFET 的交流和瞬态特性都有着决定性的影响, 因此在模型中必须考虑功率 MOSFET 的内部寄生电容, 其中主要有栅-漏电容、栅-源电容和漏-源电容. 栅-漏电容包括多晶硅栅 MOS 电容和漏区积累层电容. 在图 1(b) 中分别由  $C_{gd}$  和  $C_a$  表示. 栅-源电容主要是在多晶硅栅和源极金属间, 在图 1(b) 中由  $C_{gs}$  表示. 漏-源电容是漏区和体区的 pn 结电容, 此电容的效应在体二极管(图 1(b) 中的  $D_{body}$ ) 的结电容中得到反映. 栅-漏电容和漏-源电容有着

强烈的电压依赖关系. 栅-漏电容是一个很重要的电容, 并且难于表述, 因为它是电压的非线性函数. 栅-漏电容相对较弱. 栅-漏电容效应类似于“密勒”效应, 即在功率 MOSFET 的输入和输出之间该电容提供一个电流反馈. 这影响到器件的全部输入导纳, 导致整个动态输入电容通常比静态极间电容的总和大. 实际上, 尽管栅-漏电容的静态值比栅-源电容小, 但其上的电压幅值通常比栅-源电容上的大二十倍以上. 因而, 栅-漏电容或“密勒”电容一般需要输入更多的电荷, 这种“密勒”效应可由  $C_{gd}$  和  $C_a$  同时进行较实际的反映.

图 1(b) 中的  $L_s$ 、 $L_d$  分别表示源、漏极电感. 电感对功率 MOSFET 的动态特性有着较大的影响, 对大电流器件更加明显. 因而在此模型中考虑了这些内部电感能显著地提高动态模拟的精度. 由于模型中 JFET 并不能精确地反映功率 MOSFET 的击穿特性, 因此, 我们在模型中加入了一个二极管  $D_{break}$  和电压源  $U_{break}$ .

图 1(b) 中还加入了开关控制电路, 此电路由控制开关 S 和电流源  $I_{sk}$  组成, 目的是实现对 JFET 场效应器件的控制. 众所周知, 当 JFET 的栅-源电压  $U_{gs} > U_{ro}$  (JFET 门限电压) 时 JFET 导通; 当  $U_{gs} = U_{ro}$  时, JFET 的电流为常数; 当  $U_{gs} < U_{ro}$  时, JFET 关断. 因此我们将  $U_{ro}$  箝位于  $U_{ro}$ , 即在图 1(b) 中结点 8、6 间的电压  $U(8, 6) = U_{ro}$ . 这一过程正可由控制电路来实现, 当  $U(8, 6) > -U_{ro}$  时, S 开关闭合, 通过电流源  $I_{sk}$  对电容  $C_a$  充电, 从而使  $U(8, 6) = U_{ro}$ , 当  $U(8, 6) < -U_{ro}$  时, S 断开, 从而能较为精确地模拟功率 MOSFET 的特性.

### 3 参数提取

#### 3.1 横向 MOSFET 参数提取

MOSFET 在饱和区的电流为

$$I_d = K_p (U_{GS} - U_1)^2 (1 + \lambda U_{GS}) / 2 \quad (1)$$

其中  $U_1$  表示零偏置阈值电压;  $K_p$  表示本征跨导参数;

$\lambda$  表示沟道长度调制系数

又

$$U_{GS} = U_{GS'} + I_d R_s \quad (2)$$

$$U_{GS} = U_{GS'} + I_d (R_s + R_d) \quad (3)$$

将(2)、(3)式代入(1)式得

$$I_d = K_p (U_{GS} - U_1 - I_d R_s)^2 (1 + \lambda (U_{DS} - I_d (R_s + R_d))) / 2 \quad (4)$$

为确定 MOSFET 的  $K_p$ 、 $U_T$  和  $R_s$ , 可在漏极特性的饱和区中由三个数据点来确定. 这三点必须在同一个漏-源电压  $U_{DS1}$  条件下, 对三个数据点,  $U_{DS1} \gg I_d (R_s + R_d)$  时, 就可近似确定  $K_p$ 、 $U_T$  和  $R_s$  三个参数的值.

#### 3.2 纵向 JFET 参数的提数

门限电压 ( $U_{T0}$ ): 可从功率 MOSFET 开关特性中获得. 如图 3 所示, 漏极电压下降时的转折点电压即为 JFET 的门限电压.

漏电阻 ( $R_d$ ): 由静态源-漏导通电阻  $R$  确定, 它等于欧姆区漏极特性曲线斜率的倒数. 当  $U_{DS} = 0$  时, 此斜率由下式给出

$$R_{ds(on)} = R_d + R_s + 1 / [K_p (U_{DS} - U_T)] \quad (5)$$

电流增益( $B_t$ ):  $B_t = 100K_p$

饱和电流( $I_s$ ):  $I_s = 10^{-20}(\text{A})$

### 3.3 体二极管参数

结电容( $C_{j0}$ ):零伏时功率 MOSFET 的输出电容.

恢复时间( $T_r$ ):由功率 MOSFET 的反向恢复时间来确定.

饱和电流( $I_{s1}$ ):根据功率 MOSFET 的耐压和电流来确定.

体电阻( $R_{s1}$ ):在二极管的正向特性曲线  $I_{sd}-U_{SD}$  上取一点  $(I_{sd}, U_{DS})$ , 由  $U_D = 0.026N \ln(I_d/U_s)$

求出  $U_D$ , 然后代入式(6)

$$R_{s1} = (U_{SD} - U_D)/I_d \quad (6)$$

即可得.

### 3.4 其它参数

$C_{gd}, C_a, C_{gs}$ :对由电容-电压特性中获得.

$U_{break}$ :功率 MOSFET 的击穿电压.

作为一个实例,用以上方法对 HEXFET IRL530 进行了模型参数的提取,结果如下:

MOSFET:  $U_T = 1.823(\text{V})$   $R_s = 1.1978 \times 10^{-3}(\Omega)$

$K_p = 6.0531$

JFET:  $R_d = 1.068 \times 10^{-1}(\Omega)$   $B_t = 6.053 \times 10^2$   $I_s = 10^{-20}(\text{A})$

$D_{body}$ :  $C_{j0} = 1.158 \times 10^{-9}(\text{F})$   $T_r = 1.54 \times 10^{-7}(\text{s})$

$R_{s1} = 1.67949 \times 10^{-2}(\Omega)$   $I_{s1} = 10^{-11}(\text{A})$

$C_{gs} = 8.73 \times 10^{-10}(\text{F})$   $C_a = 1.158 \times 10^{-9}(\text{F})$

$C_{gs} = 5.7 \times 10^{-11}(\text{F})$   $L_n = 7.5(\text{nH})$

$L_d = 4.5(\text{nH})$   $I_{sk} = 1.8(\text{A})$

开关 S 闭合时  $R_{on} = 0.01\Omega$ ,  $V_{on} = 1.8\text{V}$ , 断开时  $R_{off} = \infty$ ,  $V_{off} = 0.01\text{V}$ .

## 4 模拟结果

将以上参数代入模型,利用 PSPICE 软件包进行模拟,得到了 HEXFET IRL530 的转移特性、输出特性、开关特性及栅电荷特性曲线.这些曲线与 IR 公司的 HEXFET 数据手册<sup>[5]</sup>中的相应曲线吻合得很好.图 2(a)、(b)分别为开关特性曲线和栅电荷特性曲线.用该模型及上述参数提取办法对 IR 公司的所有 HEXFET 产品进行了模拟,取得满意的结果.

**致谢** 作者衷心感谢 IR 公司副总裁 R. J. Mueller 先生、应用部主管 S. Clemente 先生和中国项目经理、高级技术顾问张为佐先生的精诚合作和有益指教.

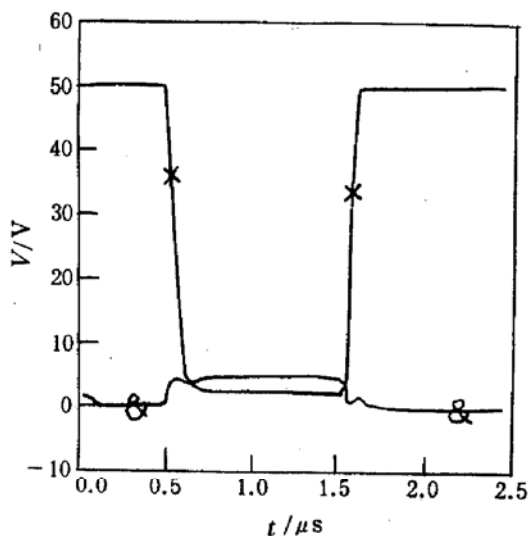


图 2(a) IRL530 开关特性  
\* 漏源电压(V) & 栅源电压(V)

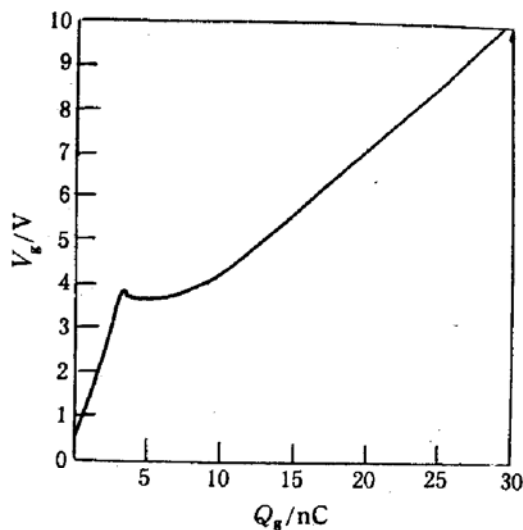


图 2(b) IRL530 栅电荷特性曲线

### 参 考 文 献

- [ 1 ] L. W. Nagel, ERL Memo. UCB/ERL M520, University of California, Berkeley, May 1975.
- [ 2 ] M. Andersson *et al.*, Applied Power Electronics Conf. March 1993, San Diego.
- [ 3 ] A. Vladimirescu *et al.*, ERL Memo. UCB/ERL M80/7, University of California, Berkeley, 1980.
- [ 4 ] C. F. Wheatly *et al.*, Hrris Semiconductor Application Note 9209, October 1992.
- [ 5 ] "HEXFET POWER MOSFET Designer's Manual", International Rectifier, September 1993, HDM-3.

## A Precise Equivalent Circuit of Power MOSFET for PSPICE Simulation

Zhou Baoxia and Chen Zhiming

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Wang Shoujue

(Institute of Semiconductor, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Received 29 November 1994, revised manuscript received 3 March 1995

**Abstract** A new model is established to make more precise simulation of power MOSFET in use of PSPICE circuit simulation software. The application results for all kinds of HEXFET devices have a very good agreement with the corresponding curves in IR data-book.

EEACC: 2560B, 2560R