

# 功率 MOSFET 反向特性的分析模拟

周宝霞 陈治明

王守觉

(西安理工大学 西安 710048) (中国科学院半导体研究所 北京 100083)

**摘要** 本文对功率 MOSFET 的反向特性进行了模拟,着重分析了 N 沟功率 MOSFET 体内集成二极管的独特作用,并对 P 沟器件在特性模拟时由于 PSPICE 模型参数的限制而表现出来的误差进行了分析,提出了改善措施,并得到了与实际相符合的结论.

EEACC:2560B,2560R

## 1 引言

功率 MOSFET 的反向特性通常不大为人所注意,这是因为电路多使用功率 MOSFET 的正向工作特性.但在双向交流开关电路、直流-直流逆变器等电路中,需要既能正向导通又能反向导通的功率开关器件.如果选用晶闸管器件作为开关,就需要并联一个整流管于其上以实现其反向导通特性,由此增加电路的复杂性.功率 MOSFET 是一个良好的选择,因为功率 MOSFET 体内有一个集成二极管,它与主器件相关联,又称为反并联二极管<sup>[1]</sup>.该二极管的存在使得功率 MOSFET 在反向工作状态有与正向一样大的电流处理能力<sup>[2]</sup>.功率 MOSFET 的剖面结构及其等效电路分别示于图 1(a)、(b)和(c).功率 MOSFET 作为双向开关元件起到简化开关电路的作用,对电路设计者来说具有重要的意义.

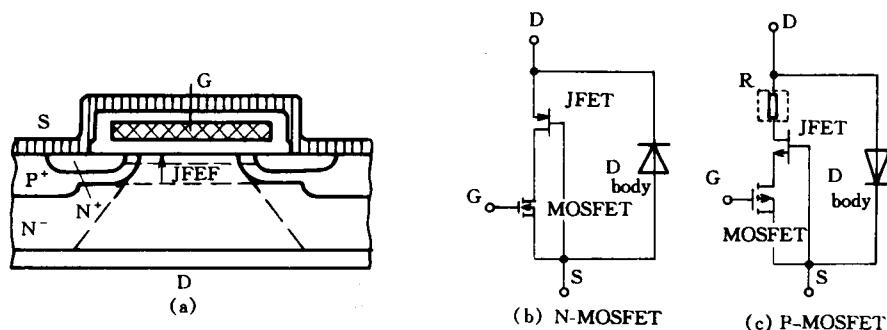


图 1 功率 MOSFET 的剖面图(a)和等效电路图(b)、(c)

周宝霞 女,1966 年生,博士研究生,从事半导体器件的研究  
陈治明 男,1945 年生,教授,博导,从事半导体器件和材料物理领域的研究与教学  
1995 年 10 月 26 日收到初稿,1996 年 4 月 8 日收到修改稿

功率 MOSFET 在反向工作时,其反向特性主要由其体内的集成二极管来承担,但又不完全和普通分立二极管的导通特性相同。因此对功率 MOSFET 反向特性的模拟分析研究是必要的。

## 2 功率 MOSFET 反向导通特性的模拟及分析

当功率 MOSFET 随受反向电压时,集成二极管处于正向导通状态,该二极管基本构成是功率 MOSFET 的漂移区与沟道区之间的 P-N 结。其通态压降较低,有较大的电流处理能力。在额定工作电流下,N 沟器件的压降在 1~2V 范围,P 沟器件稍高一些。

我们借助国际通用电路模拟软件包 PSPICE 对功率 MOSFET 反向特性进行分析。首先确定分析模型,因为 PSPICE 通用软件库中没有现成的功率 MOSFET 模型。为解决这个问题通常有两种方法,即增加 PSPICE 元件库法和等效电路法。我们选用等效电路法,等效电路模型为文[3]中所确定的模型。

为验证该模型对功率 MOSFET 反向特性的模拟的正确性,对市售器件 HEXFET IRF740 进行在栅-源电压为零时的反向特性的 PSPICE 模拟,并且与实测参数进行比较,如图 2 所示,图中平滑曲线为模拟特性,‘\*’表示测试值。由图 2 中不仅可以看到功率 MOSFET 的反向特性的模拟结果和实验数据吻合较好,而且其特性曲线类似于一个普通二极管的导通特性。为比较功率 MOSFET 的反向特性和普通二极管的区别,将功率 MOSFET 体内二极管独立置于和功率 MOSFET 加反向电压时相同的电路中,得到了与功率 MOSFET 反向特性完全一致的结果。其曲线显示于图 2 中两条曲线完全重合,所以功率 MOSFET 在栅-源电压为零时的反向特性即是二极管特性。

当在功率 MOSFET 的栅-源加上正偏压时,其反向特性会随所加偏压的大小而变化。仍以 HEXFET IRF740 为例,分别在其栅极加上 0、4 和 8V 电压,进行反向特性的模拟,得

到图 3 所示的特性曲线。从图中可观察到,当栅-源电压不同时表现出不同的反向特性。在小电流下,随着栅-源电压  $V_{GS}$  的升高,功率 MOSFET 反向导通压降  $V_{SD}$  降低,而在大电流条件下,反向特性趋于一致。

从功率 MOSFET 等效电路模型直观上分析,其反向特性有异于普通二极管是必然的。功率 MOSFET 体内除具有体二极管之外,还存在其它寄生元件如横向 MOSFET, JFET 以及栅源、栅漏和源漏电容等。静态时主要受横向 MOSFET, JFET 的影响,从而会表现出与普通二极管不同的特性。当功率 MOSFET 栅-源电压为零时,横向 MOSFET, JFET 未导通,它们的串联电路处于开路状态,对功率 MOSFET 反向特性无影响;当栅-源电压增加到超过 HEXFET 的阈值电压(3.21V)时,体内横向 MOSFET 导通,JFET 随之导通,形成对体二极管的分流电路,体电阻减小,反向导通压降降低。

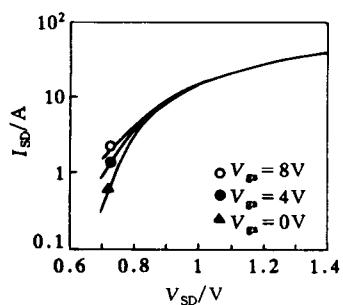


图 3 IRF740 体二极管特性模拟

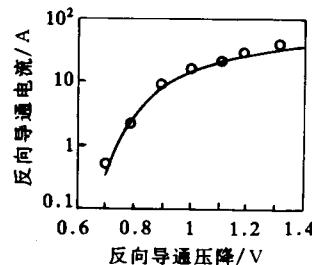


图 2 IRF740 的反向特性

$$R_D = \frac{1}{3} \left[ \frac{L_{\text{eff}}}{WC_{\text{ox}}\mu_D V_{GS}} \left( \frac{1}{V_{GS} - V_{TD}} \right) \right] \quad (1)$$

式(1)是 MOSFET 的沟道电阻  $R_D$  与其栅压  $V_{GS}$  的关系式<sup>[2]</sup>, 由式(1)可看到随着栅压  $V_{GS}$  的增大, MOS 管沟道电阻减小, 由于横向 MOSFET 和 JFET 的串联电路同体集成二极管相并联, 形成对集成二极管的分流电阻。栅压越大, 沟道电阻越小, 对集成二极管电流的分流作用越明显。在二极管电流较小的情况下, 沟道电阻上的压降低于二极管自身的压降。大部分电流从沟道电阻上流过, 沟道电阻的大小对二极管电流大小的影响就比较明显。随着电流的增加, 集成二极管上的压降逐渐低于分流电阻上的压降。这时大部分电流将从集成二极管流过, 于是沟道的影响, 也即栅压的影响就相应地减小了。从而三条曲线趋于一致。

P 沟道功率 MOSFET 同样存在这一问题, 在此不作重复, 只重点考虑在对其反向特性进行模拟时, 得到了与实际相差较大的特性这一问题。以 HEXFET 市售器件 IRF9Z24 为例, 在栅-源电压为零时得到其反向特性如图 4 中未修正曲线(unimprove)所示, 该曲线接近为一直线, 显然与实际情况不符。究其原因是在利用 PSPICE 模拟功率 MOSFET 的时候,

其等效电路的主要构成部分是一个 JFET 和一个横向 MOSFET, 其稳定导通状态用 JFET 来模拟<sup>[3]</sup>。但是, 在标准的 PSPICE 软件中, JFET 的模型参数无论是 N 沟或是 P 沟, 其阈值电压取值都为负<sup>[4]</sup>。对于 P 沟功率 MOSFET, 为模拟其集成二极管的导通状态而施加给主器件的反偏条件, 实际上使 JFET 处于通态。JFET 的通态电流迭加在集成二极管正向电流上, 歪曲了它的特性, 如图 4 所示。为弥补这一过失, 对 P 沟功率 MOSFET 进行模拟时, 应在其等效电路中的 JFET 漏极处加一阻值远大于集成二极管体电阻的电阻。这样, 就不会有 JFET 电流从二极管通过, 从而反映出集成二极管的真实特性, 如图 4 中已修正过的曲线(improved)所示。该特性曲线和 HEXFET 手册<sup>[5]</sup>中的 IRF9Z24 反向二极管特性数据完全一致。

图 4 IRF9Z24 体二极管特性模拟  
 $I_{SD}/A$   
 $V_{SD}/V$

### 3 结论

功率 MOSFET 的体内集成二极管具有普通二极管的特性, 且具有与主器件相同的电流处理能力, 在某些应用电路中具有不可代替的作用。但是, 由于受器件体内其它寄生元件的影响, 在栅-源电压不等于零时, 其工作特性不可能完全象一个普通二极管器件一样来模拟。沟道功率 NOSFET, 其通态压降在小电流下随着栅-源电压的增加而降低; P 沟道功率 MOSFET 中的集成二极管正向特性模拟结果有可能偏离实际甚远, 而必须在等效电路中适当修正。

## 参 考 文 献

- [1] 陈星弼, 功率 MOSFET 与高压集成电路, 东南大学出版社,(1990).
- [2] 美国国际整流器公司, 功率场效应管应用大全,(1991).
- [3] 周宝霞, 陈治明, 王守觉, 半导体学报, 1996, **17**(4):289.
- [4] L. W. Nagel Memo UCB/ERL M520, University of California, Berkeley, May 1975.
- [5] International Rectifier, HEXFET POWER MOSFET Designer's Manual, September 1993, HDM-3.

## Simulation for Reverse Characteristics of Power MOSFET

Zhou Baoxia and Chen Zhigming

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

Wang Shoujue

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

Received 26 October 1995, revised manuscript received 8 April 1996

**Abstract** The reverse characteristics of power MOSFET is simulated. We emphatically analyze the unique characteristics of the N-channel power MOSFET and present improved simulation about the errors of calculation for body diode in P-channel MOSFET because of the model parameter limit. The results exactly fit to the measured value.

EEACC : 2560B, 2560R