

# 4H-SiC 射频功率 MESFET 的自热效应分析\*

杨林安 张义门 龚仁喜 张玉明

(西安电子科技大学微电子研究所, 西安 710071)  
(2001 年 6 月 1 日收到 2001 年 7 月 10 日收到修改稿)

采用载流子速度饱和理论,建立了包含“自热效应”影响的适用于 4H-SiC MESFET 的大信号输出  $I-V$  特性解析模型,在模型中引入了温度变化的因素,提出了非恒定衬底环境温度  $T_0$  的热传导模型.模拟结果与实验值一致,证明基于这种模型的理论分析符合器件测试及应用的实际情况.

关键词:4H-SiC, 射频, MESFET, 直流  $I-V$  特性, 自热效应

PACC: 7210, 7220, 7280, 4410

## 1 引 言

碳化硅(SiC)宽带隙半导体材料,由于在耐高温、耐高电压、抗辐射等方面有着突出的优点,近年来受到人们的广泛重视.而基于 SiC 衬底和外延的各种器件,无论是在理论和实验研究方面还是在初步商用化方面都得到了一定的发展.在同质多型的 SiC 中,4H 型 SiC 有着更高的电子迁移率、饱和电子漂移速度和更低的各向异性特点,因此,在同质外延结构的射频(1—5GHz)功率器件领域中有广泛的应用前景,具有代表性的器件为基于低阻或半绝缘碳化硅衬底的 4H-SiC MESFET(金属-半导体场效应晶体管).

在射频与微波低端,与广泛应用的 GaAs MESFET 相比,除了宽禁带特性使 4H-SiC 具备大功率应用的优势之外,高于 GaAs 材料近 10 倍的热导率(理论值可达  $4.9\text{W}/\text{cm}\cdot\text{K}$ )使得 4H-SiC MESFET 在高温大功率下的应用远胜于 GaAs MESFET.因此,在实际应用中,4H-SiC MESFET 的大功率模块无需大体积的热沉,非常有利于模块的集成.这在相控阵雷达系统(尤其空基雷达)中是极其重要的.而正因为高热导率这一特点,使得对 SiC 器件的“自热效应”的研究并不如对 GaAs 器件那样深入,但有关实验<sup>[1,2]</sup>表明,在大功率的 4H-SiC MESFET 中,“自热效应”现象仍较为明显,这对器件  $I-V$  特性的描述及应用产生

一定的影响.因而在分析器件机理时为了避免“自热效应”的影响,通常采用脉冲  $I-V$  测试的方法<sup>[3]</sup>.

有限的热导率是造成 MESFET 沟道与衬底底部温差的主要因素(热导率与温差近似成反比),这一温差使饱和电子漂移速度、低场电子迁移率、Schottky 势垒、离化载流子浓度等参数发生变化,从而形成了  $I-V$  特性大电流饱和区中随  $V_{\text{ds}}$  增大而  $I_{\text{ds}}$  下降的“自热效应”现象.虽然 4H-SiC 的理论热导率值达  $4.9\text{W}/\text{cm}\cdot\text{K}$ ,但实际上远达不到这一理想值,Cree Inc. 发表的数据为  $3.6\text{W}/\text{cm}\cdot\text{K}$ (沟道掺杂为  $10^{17}\text{cm}^{-3}$ 量级),而文献[4]中为  $3.2\text{W}/\text{cm}\cdot\text{K}$ ,同时衬底材料制造过程中缺陷和杂质的影响使这一值更低<sup>[2]</sup>,因此实际器件结构中的热导率降低足以造成温差加大而使“自热效应”趋于明显,故在建立器件模型时必须考虑“自热效应”的因素.

本文采用我们已经建立的适用于室温下 4H-SiC MESFET 的大信号直流  $I-V$  特性解析模型<sup>[5]</sup>,并转化为迭代形式以利于分析“自热效应”中温度的变化过程.在此基础上,根据器件的工作状态,我们提出了以下观点:1)在每个确定的漏源偏置  $V_{\text{ds}}$  点,衬底底部的参考温度  $T_0$  非恒定;2)随  $V_{\text{ds}}$  增加,  $T_0$  近似线性增加;3)考虑源漏电阻  $R_s$  和  $R_d$  随温度变化的因素.在模型的迭代求解过程中,这些因素的引入并未明显增加运算的复杂度及迭代收敛性,但物理分析过程更趋于实际情况.基于这一改进的分析模型避免了文献[2]中为了拟合试验数据而对沟道

\* 国防预研基金(批准号 8.1.7.3)资助的课题.

长度进行调整的措施,在运算量上也远小于数值模型<sup>[4]</sup>。

## 2 4H-SiC MESFET 直流 $I$ - $V$ 特性变温模型及“自热效应”分析

采用载流子速度饱和理论,我们已经导出了适用于室温下(300K)4H-SiC MESFET 大信号直流  $I$ - $V$  特性  $I_{ds}(V_{gs}, V_{ds})$  的解析模型<sup>[5]</sup>,

$$I_{ds}(V_{gs}, V_{ds}) = I_{dsat}(1 + \lambda V_{ds}) \tanh(\alpha V_{ds}), \quad (1)$$

式中

$$1) \quad I_{dsat} = qN_D^+ v_s a W (1 - u_m)$$

其中  $u_m(V_{gs})$  由

$$u_m^3 + 3u_m \left( \frac{1}{Z} - \frac{V_{bi} - V_{gs}}{V_p} \right) + 2 \left( \frac{V_{bi} - V_{gs}}{V_p} \right)^{3/2} - \frac{3}{Z} = 0 \text{ 确定,}$$

$$Z = \mu_{n0} V_p / v_s L_g \text{ 为速度饱和因子,}$$

$$V_p = qN_D a^2 / 2\epsilon_r \epsilon_0 \text{ 为夹断电压,}$$

$$V_{bi} \text{ 为自建势.}$$

$$2) \quad \lambda = \left( \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{ds}} \Big|_{V_{ds} \geq V_{dsat}} \right) / I_{dsat} \\ = g_{ds}(V_{gs}, V_{ds}) / I_{dsat}(V_{gs})$$

其中  $g_{ds}(V_{gs}, V_{ds}) = 2\epsilon_r \epsilon_0 W v_s^2 / \left[ \pi \mu_{n0} V_{ds} \left( 1 - \frac{I_{dsat}}{I_0} \right) \right]$ ,  
( $V_{ds} \geq V_{dsat}$ ).

$$3) \quad \alpha = \left( \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{ds}} \Big|_{V_{ds} \rightarrow 0} \right) / I_{dsat} = g_{d0}(V_{gs}) / I_{dsat}(V_{gs})$$

其中

$$g_{d0} = (qN_D^+ W a \mu_{n0} / L_g) \cdot (1 - \sqrt{(V_{bi} - V_{gs}) / V_p}).$$

由于源、漏电阻  $R_s$  和  $R_d$  的影响(1)式中实际器件外部栅源偏压  $V_{gs}$  和漏源偏压  $V_{ds}$  与 MESFET 本征模型中的偏压关系为

$$V_{gs}(\text{intrinsic}) = V_{gs}(\text{external}) - I_{ds} R_s,$$

$$V_{ds}(\text{intrinsic}) = V_{ds}(\text{external}) - I_{ds}(R_s + R_d).$$

考虑上述关系,则(1)式为迭代求解形式的  $I_{ds}$  双曲正切函数非线性描述,它即保持了器件物理分析机理又体现了经验模型的简明计算过程,适合于对 4H-SiC MESFET 的非线性大信号分析。

为了分析器件“自热效应”,则必须考虑由于功率耗散而使器件内部温度增加的因素,尤其在  $I$ - $V$

特性的大电流饱和区域内,器件温度有明显的升高,因而电子饱和漂移速度  $v_s$ 、低场迁移率  $\mu_{n0}$ 、离子杂质浓度  $N_D^+$ 、栅源和漏区的电阻等影响  $I_{ds}$  关系的重要参数都会随温度发生变化<sup>[6]</sup>,从而使  $I_{ds}$  的曲线形状变化。

引入温度变化的因素之后,根据理论分析和对实验数据的拟合,得到如下参数的温度函数关系。

### 1) 电子饱和漂移速度

$$v_s(T) = \frac{2\hbar u_s}{\sqrt{3\pi}} \frac{D}{\Xi} \left( m_l k_B T + \frac{\hbar m_l u_s}{2\omega_0} \cdot \frac{\exp(\hbar\omega_0/k_B T) + 1}{\exp(\hbar\omega_0/k_B T) - 1} \left( \frac{E}{\Xi} \right)^2 \right), \quad (2)$$

其中  $u_s = 13300$  m/s 为 SiC 声子速度;  $D = 6.5 \times 10^9$  eV/cm 为耦合常数;  $\Xi = 15$  eV 为声变势;  $\omega_0$  为光声子频率( $\hbar\omega_0 = 120$  meV);  $m_l = 0.42m_0$  为横向有效质量<sup>[2]</sup>。室温下  $v_s = 2 \times 10^7$  cm/s,这一公式比文献[7]中的关系式更为精确。

### 2) 拟合试验数据的低场电子迁移率

$$\mu_{n0}(T) = \mu_0 (T/300)^{-2.25}, \quad (3)$$

其中,  $\mu_0 = 427$  cm<sup>2</sup>/Vs 为  $T = 300$  K 时的电子迁移率<sup>[2]</sup>。

### 3) 杂质离子化梯度<sup>[7]</sup>

$$\kappa(T) = \frac{N_D^+}{N_D} \\ = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4g_c \frac{N_D}{N_C} \exp\left(\frac{E_D}{k_B T}\right)}}{2g_c \frac{N_D}{N_C} \exp\left(\frac{E_D}{k_B T}\right)} \\ (E_D = 75 \text{ meV}, g_c = 2), \quad (4)$$

其中,导带底有效态密度  $N_C = 2.513 \times 10^{19} (T/300)^{3/2} (m_c/m_0)^{3/2}$ 。由于 SiC 室温下存在“冻析效应”,故(4)式需要考虑,但由于离子化载流子浓度的变化较其他参数对“自热效应”的作用小<sup>[2]</sup>,因而(4)式采用一级离子化近似计算。

### 4) 自建势

$$V_{bi}(T) = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{N_D^+}{n_i}\right), \quad (5)$$

其中,本征载流子浓度

$$n_i(T) = 2 \left( \frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_c m_v)^{3/4} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right), \\ (m_c = 0.76m_0, m_v = 1.20m_0)^{[4]},$$

关系式(5)为自建势的近似表达式。

### 5) 热导率<sup>[2]</sup>

$$K(T) = K_0 (T/300)^{-1.5}, \quad (6)$$

式中  $K_0 = 3.2 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$  为 300K 温度下掺杂浓度  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  量级的热导率,  $-1.5$  次方的指数值符合有关文献所发表的实验数据范围.

### 6) 源、漏电阻

由于源、漏电阻  $R_s$  和  $R_d$  由两部分组成, 即欧姆接触电阻和有源区体电阻. 欧姆接触电阻取决于隧道效应, 近似认为与温度变化无关, 而有源区体电阻则与温度有关

$$R_s(\text{sub}) = \frac{L_{gs}}{qN_D^+ W a \mu_{n0}}, \quad R_d(\text{sub}) = \frac{L_{gd}}{qN_D^+ W a \mu_{n0}},$$

故源、漏电阻为

$$\begin{aligned} R_s(T) &= R_{\text{ohmic}} + R_s(\text{sub}), \\ R_d(T) &= R_{\text{ohmic}} + R_d(\text{sub}), \end{aligned} \quad (7)$$

其中欧姆接触电阻  $R_{\text{ohmic}}$  值根据文献[2]的源、漏电阻提取数据推算得到, 这种近似分析有利于保持模拟精度, 因为欧姆接触电阻率与器件工艺密切相关, 理论上难以精确描述.

由于热传导而形成的温差  $\Delta T$  决定于热导率  $K(T)$  根据 Kirchoff 变换<sup>[8]</sup>, 沟道与衬底底部温差  $\Delta T = T - T_0$  表示式为

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \frac{(1 - P_{\text{diss}}/4P_0)^4}{(1 - P_{\text{diss}}/4P_0)^4}, \quad (8)$$

其中  $P_{\text{diss}} = I_{\text{ds}} V_{\text{ds}}$  为器件耗散功率;  $P_0 = \frac{\pi K(T_0) W T_0}{\ln(8t_{\text{sub}}/\pi L_g)}$  为衬底底部温度保持  $T_0$  时的归一化功率,  $T_0$  恒定时  $P_0$  为一常量.

将(8)式与(1)式迭代求解, 并考虑(2)–(7)式的温度关系, 则可求出对应  $V_{\text{ds}}$  的  $I_{\text{ds}}$  收敛值(以温差  $\Delta T$  的变化量为收敛判据), 通常认为衬底底部温度保持  $T_0(300\text{K})$  不变而简化计算过程, 文献[2]采用这种假设. 但是无论在封装或不封装的芯片测试还是在器件的工作过程中, 保持  $T_0$  为恒定室温是不可能的. 随温度的升高, 衬底底部温度  $T_0$  也存在不同程度的增加, 直至达到温度平衡. 根据(6)式, 热导率呈下降趋势直至平衡(8)式中的  $P_0$  因此也不为常量而是呈下降趋势, 这样就无需文献[2]中提出的调整热沟道长度使  $P_0$  降低的假设. 另外, 随着漏源偏压  $V_{\text{ds}}$  的增加, 初始衬底底部温度  $T_0$  也略有增加, 在文献[2]的图 10 中, 计算与实验数据的偏差或许来源于将  $T_0$  固定为 300K 的假设, 若将  $T_0$  修正为随  $V_{\text{ds}}$  线性增加, 则计算值与实验值趋于一致.

综上所述, 本文提出如下温度变化模式.

1)  $V_{\text{ds}}$  固定的情况下, 变化的衬底底部温度  $T_0$  与温差  $\Delta T$  之间以线性关系描述, 即

$$T_0(i+1) = T_0(i) + \beta \cdot \Delta T, \quad (9)$$

其中  $\beta$  为与实验数据的拟合系数,  $i$  为迭代次数.

将(9)式代替(8)式中的  $T_0$ , 再与(1)式进行迭代计算.

2) 随着漏源偏压  $V_{\text{ds}}$  的增加, 初始衬底底部温度  $T_0(0)$  的线性变化关系为

$$T_0(0) = 300 + \gamma \cdot V_{\text{ds}}, \quad (10)$$

其中  $\gamma$  为与实验数据的拟合系数.

将(10)式作为(9)式的初始值  $T_0(0)$ .

## 3 模拟结果分析

模型采用的 4H-SiC MESFET 结构如图 1 所示. 结构参数为<sup>[2]</sup> 栅长  $L_g = 1.2 \mu\text{m}$ , 栅宽  $W = 150 \mu\text{m}$ , 沟道深度  $a = 0.27 \mu\text{m}$ , 衬底厚度  $t_{\text{sub}} = 300 \mu\text{m}$ , 栅源间距  $L_{gs} = 0.5 \mu\text{m}$ , 漏源间距  $L_{gd} = 2.5 \mu\text{m}$ , 沟道掺杂  $N_D = 1.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $p^-$  隔离层厚度  $1 \mu\text{m}$  ( $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ), 欧姆接触  $n^+$  层  $0.2 \mu\text{m}$  ( $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ).

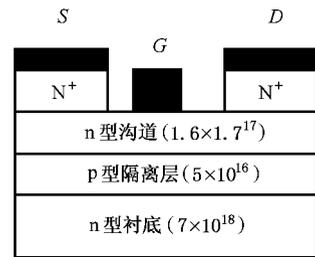


图 1 4H-SiC n 沟 MESFET 剖面图

将上述参数代入前面建立的模型中求解, 计算结果见图 2 所示. 图中显示了 4H-SiC MESFET 的直流  $I-V$  特性的三组曲线, 分别是考虑和不考虑“自热效应”的  $I-V$  特性模拟计算值、及存在“自热效应”影响的实验值, 可见本文建立的“自热效应”模型与实验数据非常一致. (9)(10)式中的拟合系数值近似为  $\beta = 1, \gamma = 0.5$ . 这两个拟合系数的引入反映了实验数据的实际提取过程, 若在器件的实际应用中很好地处理散热, 图 2 中的“自热效应”现象会减弱. 因此, SiC MESFET 的高温应用仍具有明显的优势, 其主要原因是高温下沟道杂质电离率提高, 使自由载流子浓度增加, 部分地补偿了饱和漂移速度和迁

移率的下降.

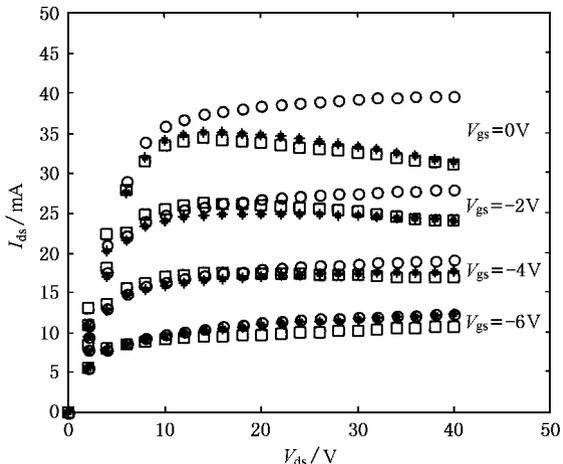


图2 4H-SiC MESFET的 I-V 特性(其中 \* 为有自热效应的模拟结果, o 为不考虑自热效应的模拟结果, □ 为测试结果)

衬底厚度  $t_{sub}$  是分析“自热效应”的重要参数, 减薄衬底则会减弱“自热效应”的影响, 图3显示了由本文模型模拟出的不同衬底厚度的“自热效应”. 另外, 多栅结构的 MESFET 器件的“自热效应”比单栅结构更明显, 加大栅指间距是有效的方法, 但同时降低了器件的工作频率.

### 4 结 论

本文首先建立了应用于 4H-SiC 射频功率 MESFET 的大信号 I-V 特性解析模型, 模型采用了载流子速度饱和理论和双曲正切函数的描述方法, 并引

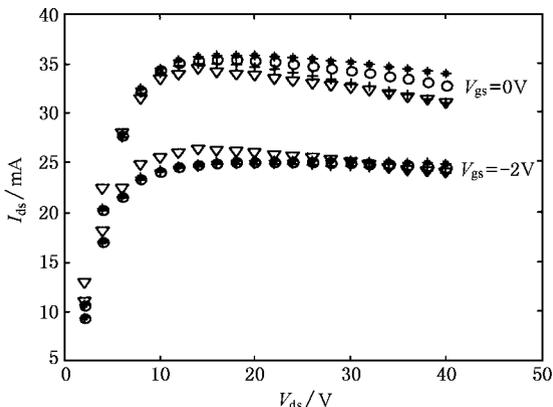


图3 衬底厚度对“自热效应”的影响(\* 为 10 $\mu$ m, o 为 50 $\mu$ m, + 为 500 $\mu$ m 的模拟结果;  $\nabla$  为 300 $\mu$ m 的测试结果)

入了温度参数, 在此基础上对器件的“自热效应”进行了分析. 在分析过程中为了符合器件测试的实际情况, 提出了器件衬底底部温度  $T_0$  为非恒定的模型, 即 1) 漏极偏压增加; 2) 迭代过程中沟道与衬底底部温差  $\Delta T$  的变化这两个因素使  $T_0$  从室温 (300K) 逐渐升高至热平衡. 由于源区和漏区的电阻  $R_s, R_d$  对 I-V 特性的影响, 本文也考虑了它们的温度效应. 模拟结果与实验数据的一致性很好, 而对这些因素的考虑未影响模型运算的迭代收敛性, 也未明显增加计算量, 因此在大功率 SiC MESFET 的研究过程中, 这一模型非常适合于包括“自热效应”在内的器件温度特性分析. 需指出, 虽然存在“自热效应”, 但 SiC MESFET 的微波功率应用, 尤其是高温应用较 GaAsFET 仍有很大的优势.

[ 1 ] Schwierz F, Roschke M and Liou J J 1998 *Material Science Forum* **264** - 268 973  
 [ 2 ] Royet A S, Ouisse T, Cabon B *et al* 2000 *IEEE Trans. Electronics Devices* **47** 2221  
 [ 3 ] Siriex D, Nobolic O, Barataud D *et al* 1999 *IEEE Trans. Electron Devices* **46** 580  
 [ 4 ] Huang M W, Goldsman N, Chang C H *et al* 1998 *Journal of Applied Physics* **84** 2065  
 [ 5 ] Yang L A, Zhang Y M, Lü H L *et al* 2001 *Chinese Journal of Semi-*

*conductors* **22** 1160 ( in Chinese)[ 杨林安、张义门、吕红亮等 2001 半导体学报 **22** 1160 ]  
 [ 6 ] Shang Y C, Zhang Y M, Zhang Y M 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1786 ( in Chinese ] 尚也淳、张义门、张玉明 2000 物理学报 **49** 1786 ]  
 [ 7 ] Ruff M, Mitlener H, Helbig R 1994 *IEEE Trans. Electron Devices* **41** 1040  
 [ 8 ] Canfield P C, Lam S C F, Allstot D J 1990 *IEEE Journal of Solid-State Circuits* **25** 299

## Analysis of self-heating effect on 4H-SiC RF power MESFETs<sup>\*</sup>

Yang Lin-An   Zhang Yi-Men   Gong Ren-Xi   Zhang Yu-Ming

( *Microelectronics Institute , Xidian University , Xi 'an 710071 , China* )

( Received 1 June 2001 ; revised manuscript received 10 July 2001 )

### ABSTRACT

A large-signal analytical model with temperature considered for 4H-SiC radio frequency power MESFET  $I$ - $V$  characteristics is proposed based on the theory of saturated carrier velocity , by means of which the self-heating effect is taken into account so as to analyze the temperature performance of SiC power MESFET. The heat transport between the channel and the substrate is modeled with non-constant temperature  $T_0$  at the bottom of 4H-SiC substrate in order to fit the real actions of devices. A good agreement between simulation and measurement is obtained.

**Keywords** : 4H-SiC , radio frequency , MESFET , DC  $I$ - $V$  characteristics , self-heating

**PACC** : 7210 , 7220 , 7280 , 4410

---

<sup>\*</sup> Project supported by the Advanced Research Foundation for National Defense of China ( Grant No. 8.1.7.3 ).