

# 陷阱效应对 4H-SiC MESFET 温度特性的影响\*

吕红亮<sup>1,†</sup> 张义门<sup>1</sup> 张玉明<sup>1</sup> 车 勇<sup>2</sup> 王悦湖<sup>1</sup>

(1 西安电子科技大学微电子学院, 教育部宽禁带半导体重点实验室, 西安 710071)

(2 武警工程学院军械运输系, 西安 710086)

**摘要:** 针对 4H-SiC 射频 MESFET 中的自热效应, 建立了基于解析模型的材料参数温度模型和器件直流模型. 研究了由陷阱造成的背栅效应, 并结合材料的温度特性分析了温度升高对器件特性的影响. 分析了陷阱对器件特性的影响, 并进一步阐明了陷落-发射机制. 计算得到陷阱能级为 1.07eV, 俘获截面为  $1 \times 10^{-8} \text{cm}^2$ , 器件的自升温达到 100K 以上, 能够较好地反映实验结果. 分析结果表明, 背栅电势随陷阱浓度的增大而增大, 并随着漏极电压的增大而减小, 在室温下达到  $\sim 3\text{V}$ . 另外, 由于器件中存在自热效应, 背栅电势随漏压的变化加剧. 这些模拟分析对实际器件的设计及工艺制造提供了理论上的依据.

**关键词:** SiC; MESFET; 自热效应; 深能级陷阱

**PACC:** 2560; 7210; 7250 **EEACC:** 2520M

**中图分类号:** TN31 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2008)02-0334-04

## 1 引言

由于 SiC 材料具有宽禁带、高击穿电场、高载流子漂移速度、高热导率等优点, 4H-SiC 基射频 MESFET 有望在射频功率器件领域中, 尤其是移动通信基站、相控阵雷达系统等方面发挥巨大的作用<sup>[1]</sup>. 然而实际研究中发现, 尽管 SiC 拥有高于 GaAs 十倍的热导率, 但在大功率应用中仍然存在“自热效应”现象<sup>[2]</sup>. 这是因为热导率本身是一个随温度变化的值, 实际器件中测量得到的热导率小于  $4.9 \text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ , 大约为  $3.2 \text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$  左右<sup>[3]</sup>. 另外, 由于材料和器件制造工艺中引入了陷阱, 而陷阱对器件特性的影响又与温度密切相关, 这就增加了器件自热效应研究的复杂度.

目前, 对 4H-SiC MESFET 自热效应的研究主要有两种方法: Royet 等人<sup>[2]</sup> 通过设计针对性实验, 从实验  $I-V$  曲线中拟合反推出 SiC 材料的有效热导率, 这一方法虽然能够反映该器件的特性, 但是难以向其他器件推广, 不具有普遍性. 杨林安等人<sup>[4]</sup> 在此基础上提出了基于物理参数改变的“衬底变温自热效应模型”, 充分考虑了饱和漂移速度、载流子迁移率、离化率等因素随温度的变化. 该模型更加注重自热效应的物理含义, 但是在迭代过程中衬底温度的选择缺乏依据, 既没有考虑衬底温度梯度分布对平均热导率的影响, 也没有充分考虑衬底陷阱与自热效应之间的相互作用.

本文针对 4H-SiC 射频 MESFET 中的自热效应, 首先建立了基于解析模型的器件直流模型和小信号参数模型, 同时在等效电路模型中加入陷阱的影响, 引入能够反映陷阱影响的参数. 在此基础上考虑温度对材料参

数和陷阱的影响, 分析了器件的高温特性. 这些模拟分析对实际器件的设计及工艺制造提供了理论依据.

## 2 模型

电子在陷阱能级上的陷落和发射过程与器件的偏置电压及频率有关. 处于禁带中央附近的类受主陷阱在俘获电子后呈负电性, 根据电中性条件, 在沟道底部会产生一个带正电的附加耗尽区. 随着漏极电压增大, 当  $V_{ds} = 10\text{V}$  左右时, 靠近沟道漏极的费米能级接近陷阱能级. 此时, 电子从陷阱能级向导带跃迁截面增大. 电子发射过程减小了附加耗尽区的宽度, 从而使漏极电流增大<sup>[5]</sup>.

陷阱浓度的变化可以表示为以下形式:

$$N_t = N_{t0} \exp(-\beta(V_{DS} - V_{Don})) \quad (1)$$

式中  $N_t$  是 n 型沟道与半绝缘 buffer 界面上被占据的陷阱浓度;  $V_{Don}$  是陷落的电子开始向导带发射时的漏极电压. 这个数值与栅极电压相关, 根据测量得到的  $I-V$  曲线, 这一数值可以通过拟合得到, 其表达式为:

$$V_{Don} = a_0 + a_1 V_G + a_2 V_G^2 \quad (2)$$

其中  $a_0, a_1$  和  $a_2$  分别是拟合得到的参数. 设  $a$  是沟道厚度,  $W$  是器件宽度,  $v_{sat}$  是载流子饱和速度, 则由于电子陷落和发射导致的附加电流可以表示为:

$$I_t = qv_{sat} N_{t0} Wa [1 - \exp(-\beta(V_D - V_{Don}))] \quad (3)$$

SiC MESFET 的基本电流-电压特性采用三段式模型<sup>[6]</sup>. 考虑陷阱的影响, 漏极电流可以表示为:

$$I_D(V_G, V_D) = I_P \frac{[3(u_d^2 - u_0^2) - 2(u_d^3 - u_0^3) - 2(u_{td}^3 - u_{t0}^3)] / \sqrt{1 + n_c / N_T}}{1 + Z(u_d^2 - u_0^2)} \quad (4)$$

\* 国家自然科学基金(批准号:60606022)和应用材料创新基金(批准号:XA-AM-200702)资助项目

† 通信作者. Email: hllv@mail.xidian.edu.cn

2007-07-21 收到, 2007-08-14 定稿

其中  $I_P, V_P, Z$  的表达式分别为:

$$I_P = \frac{q^2 n_c^2 \mu_0 W a^3}{6\epsilon L}, V_P = \frac{q n_c a^2}{2\epsilon}, Z = \frac{q n_c \mu_0 a^2}{2\epsilon L v_s}$$

$u_d(u_0)$  是漏端(源端)耗尽层宽  $h_d(h_0)$  相对于沟道厚度  $a$  的归一化系数:

$$u_0(V_G) = \frac{h_0}{a} = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{2\epsilon}{q n_c} (V_G + V_{bi})} = \sqrt{\frac{V_G + V_{bi}}{V_P}} \quad (5)$$

$$u_d(V_G, V_D) = \frac{h_d}{a} = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{2\epsilon}{q N_D} (V_D + V_G + V_{bi})} = \sqrt{\frac{V_D + V_G + V_{bi}}{V_P}} \quad (6)$$

$$u_{t0}(V_G) = \frac{h_{t0}}{a} = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{2\epsilon}{q n_c} V_{tbi}} = \sqrt{\frac{V_{tbi}}{V_P}} \quad (7)$$

$$u_{td}(V_G, V_D) = \frac{h_{td}}{a} = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{2\epsilon}{q n_c} (V_D + V_{tbi})} = \sqrt{\frac{V_D + V_{tbi}}{V_P}} \quad (8)$$

$$V_{tbi} = \frac{kT}{q} \ln(n_c N_t / n_i^2) \quad (9)$$

$V_{bi}$  是栅极的肖特基内建电势;  $V_{tbi}$  是陷阱引起的内建电势;  $n_i$  是电中性载流子浓度;  $\epsilon$  是介电常数;  $q$  是电子电量;  $k$  是玻尔兹曼常数;  $T$  是温度;  $\mu_n$  是低场迁移率;  $L$  是栅长;  $n_c$  是沟道电子浓度, 其大小等于沟道掺杂浓度  $N_d$ 、碰撞离化产生的载流子以及陷阱发射载流子之和.

在饱和区,  $V_{DS} = V_{DS, sat} = q n_c a^2 / (2\epsilon) - V_{bi} + V_{GS}$ . 考虑到载流子速度饱和, 沟道靠近漏极一段的饱和电流可以表示为:  $I_D = q N_d v_{sat} W a (1 - u_s)$ . 其中,  $u_s$  是此时漏极附近耗尽层厚度与沟道厚度的归一化数值.

温度对 SiC 材料参数的影响作者在另一篇论文中详细讨论<sup>[7]</sup>, 这里不再赘述. 根据传热学原理<sup>[8]</sup>, 热量在单一物质中传导时, 温度呈线性分布. 假设在 MESFET 沟道发热区到衬底的热沉接触之间温度的分布满足:

$$T(y) = T_0 + y \frac{\Delta T}{t_{sub}} \quad (10)$$

其中  $y$  是器件中的纵向位置;  $t_{sub}$  是器件的衬底厚度;  $T_0$  是环境温度;  $\Delta T$  为器件的自升温. 另外, 对于 SiC 材料, 热导率可以表示为温度的函数:

$$K(T) = K_0 (T/300)^{-1.5} \quad (11)$$

结合(10)和(11)式, 器件自升温为  $\Delta T$  时的等效热导率为:

$$\bar{K} = \frac{\int_0^{t_{sub}} K(T) dy}{t_{sub}} = K_0 \frac{300}{0.5 \Delta T} \left( \sqrt{\frac{300}{T_0}} - \sqrt{\frac{300}{T_0 + \Delta T}} \right) \quad (12)$$

定义一个功率常量  $P_0 = \frac{\pi K(T_0) W T_0}{\ln(8 t_{sub} / \pi L)}$ , 则沟道发热区到衬底之间的温度差可以使用 Kirchoff 变换求得:

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \frac{1 - (1 - P_{diss} / 4 P_0)^4}{(1 - P_{diss} / 4 P_0)^4} \quad (13)$$

在不同温度下, 材料与器件特性将随之改变, 考虑到这些温变因素, 将(13)式与  $I(V_{DS}, V_{GS})$  迭代求解, 则

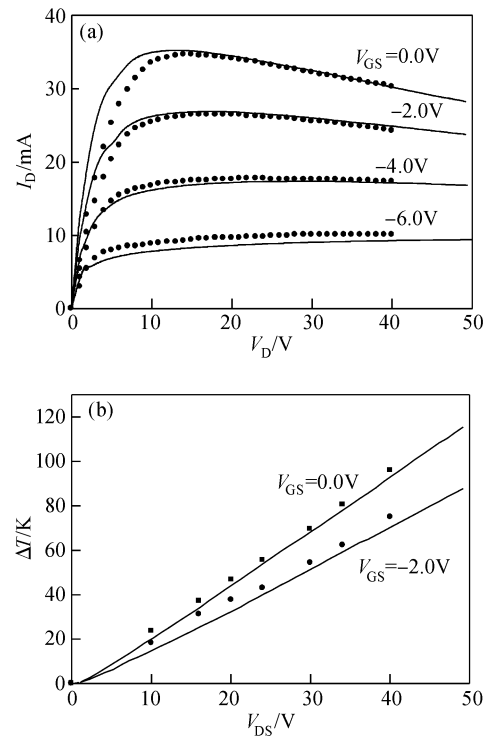


图1 考虑自热效应计算器件  $I-V$  特性(a)和自升温(b)

Fig.1 Simulated and experimental<sup>[2]</sup>  $I-V$  characteristics (a) and self-heating temperature (b)

可求出对应  $I-V$  收敛值(以温差  $\Delta T$  的变化量为收敛依据).

陷阱的陷落和发射时间常数  $t_d$  取决于陷阱的位置和自身特性, 也可以通过电流滞后现象得到. 发射时间可以表示为:

$$t_d = 1 / \left( \sigma_n v_{th} N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_t}{kT}\right) \right) \quad (14)$$

其中  $\sigma_n$  是俘获截面; 热速度  $v_{th} = (3kT/m_c^*)^{1/2}$ ;  $m_c^*$  是电子有效质量;  $E_c$  和  $E_t$  是导带和陷阱能级. 发生频率偏移的峰值频率可以表示为:

$$f_p = 2\pi t_d \quad (15)$$

### 3 模拟结果

采用上述计算方法, 结合文献[2]的实验结果, 模拟器件  $I-V$  特性如图1所示. 器件结构为栅长  $1.2\mu\text{m}$ , 栅宽  $150\mu\text{m}$ , 衬底厚度为  $300\mu\text{m}$ . 在图1(a)中, 当  $V_{GS}$  为  $0.0\text{V}$ ,  $V_{DS}$  大于  $20\text{V}$  时,  $I-V$  曲线出现了明显的电流减小, 这是由于在大功率下器件自升温引起的. 从图(b)中可以看出, 此时器件自升温达到  $100\text{K}$  左右. 当栅压负向增大时, 由于功耗降低, 自热效应减弱, 电流减小现象逐渐消失. 这与图(b)中的升温趋势是一致的. 计算结果能够较好地反映器件特性, 说明“等效热导率模型”能够较为正确地仿真器件的热效应.

在本文的模型中, 陷阱效应对器件特性的影响集中地表现为寄生栅对沟道有效区的控制, 这也称之为背栅效应. 为了进一步分析背栅效应在器件中的作用和影

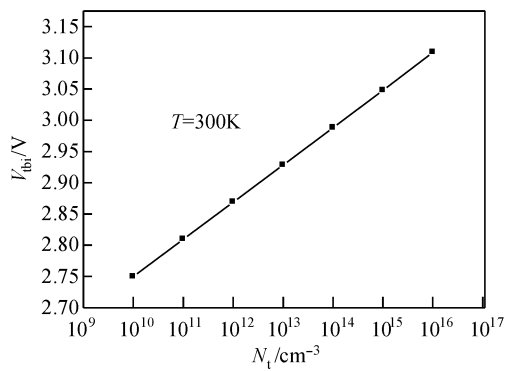


图 2 计算得到背栅电势随陷阱浓度的变化

Fig.2 Dependence of back gate potential on trap concentration

响,这里特别对背栅电势  $V_{tbi}$  加以讨论. 根据(9)式,背栅电压与陷阱浓度和温度有很大关系. 如图 2 所示,随着陷阱浓度的增大,背栅电势也会增大,从而使得器件有效沟道减小,由于陷阱效应而引起的电流减小更明显.

相比较而言,温度对背栅电压的影响更为复杂一些. 在(9)式中,  $V_{tbi}$  不仅与温度存在显式关系,而且与之密切相关的  $n_c$  和  $N_t$  也是随温度变化的. 由于“冻析效应”,沟道中的有效载流子浓度随着温度的增大而增大. 此外,由于自热效应,器件在工作过程中不可避免地出现自升温,我们没有单独考虑温度的影响,而是将器件端特性引入,综合几方面因素,考虑漏极电压对背栅电势的影响.

从图 3 可以看出,随着漏极电压的升高,器件由于自热效应产生自升温,沟道中的载流子浓度和陷阱浓度随之变化. 在这些因素的共同作用下,背栅电势呈下降趋势.

从文献[9]的实验结果可以画出 Arrhenius 曲线图,如图 4 所示. 根据(14)和(15)式,陷阱能级和俘获截面可以分别从曲线的斜率和截距求得. 陷阱能级在导带下方 1.07eV 处,陷阱的俘获截面为  $1 \times 10^{-8} \text{ cm}^2$ . 图中内嵌转换频率随温度的变化关系. 这一结果与前面的分析也较为一致.

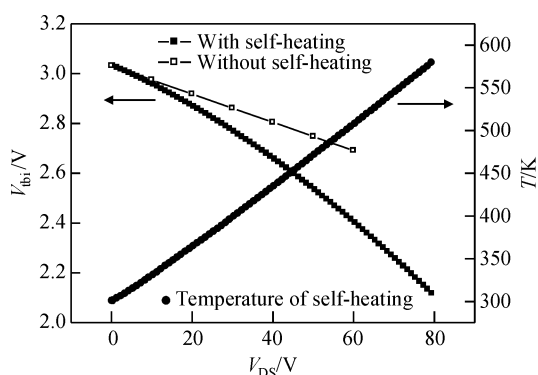


图 3 背栅电势随漏极电压的变化

Fig.3 Dependence of back gate potential on drain bias

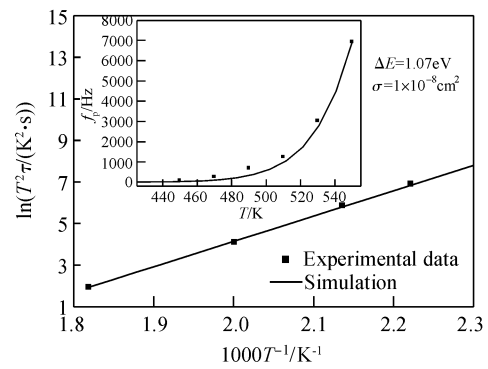


图 4 器件特性的 Arrhenius 图

Fig.4 Arrhenius plot of device

## 4 结论

本文建立了 SiC MESFET 器件陷阱效应和自热效应模型,在此基础上对器件的温度特性进行仿真. 提出了等效热导率模型,模拟结果表明,器件在工作条件下产生的自升温达到 100K 左右,这与实验具有较好的一致性. 结合自热效应和背栅效应,分析了陷阱对器件特性的影响,进一步阐明了陷落-发射机制. 计算得到陷阱能级为 1.07eV,俘获截面为  $1 \times 10^{-8} \text{ cm}^2$ ,能够较好地反映实验结果. 本文的研究结果揭示了器件的温度特性不仅与材料的热导率有密切关系,而且与陷阱效应有关. 陷阱效应对高温条件下 4H-SiC MEFET 的大信号特性具有重要影响.

## 参考文献

- [1] Clarke R C, Palmour J W. SiC microwave power technologies. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(6): 987
- [2] Royet A S, Quisse T, Cabon B, et al. Self-heating effects in SiC MESFETs. IEEE Trans Electron Devices, 2000, 47(11): 2221
- [3] Huang M, Goldsman N, Andrei P. Determining 4H silicon carbide electronic properties through combined use of device simulation and metal-semiconductor field-effect-transistor terminal characteristics. J Appl Phys, 1998, 84(8): 2065
- [4] Yang Lin'an, Zhang Yimen, Gong Renxi, et al. Analysis of self-heating effect on 4H-SiC RF power MESFETs. Chinese Physics, 2002, 51(1): 148 (in Chinese) [杨林安, 张义门, 龚仁喜, 等. 4H-SiC 射频功率 MESFET 的自热效应分析. 物理学报, 2002, 51(1): 148]
- [5] Mukherjee S S, Islam S S. An analytical model of SiC MESFETs incorporating trapping and thermal effects. Semiconductor Device Research Symposium, 2003: 366
- [6] Lv Hongliang, Zhang Yimen, Zhang Yuming, et al. Analytical model of I-V characteristics of 4H-SiC based on multiparameter mobility model. IEEE Trans Electron Devices, 2004, 51(7): 1065
- [7] Lv Hongliang, Zhang Yimen, Zhang Yuming. Simulation study for high temperature characteristics of SiC MESFETs. Journal of Xidian University, 2001, 28(6): 776 (in Chinese) [吕红亮, 张义门, 张玉明. 高温 SiC MESFET 特性模拟研究. 西安电子科技大学学报, 2001, 28(6): 776]
- [8] Yang Shiming. Thermal conduction. Beijing: Higher Education Press, 2005 (in Chinese) [杨世铭. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 2005]
- [9] Sghaier N, Bluet J M, Souifi A. Study of trapping phenomenon in 4H-SiC MESFETs; dependence on substrate purity. IEEE Trans Electron Devices, 2003, 50(2): 297

## Influence of the Trapping Effect on Temperature Characteristics in 4H-SiC MESFETs

Lü Hongliang<sup>1,†</sup>, Zhang Yimen<sup>1</sup>, Zhang Yuming<sup>1</sup>, Che Yong<sup>2</sup>, and Wang Yuehu<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices of the Ministry of Education, Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 Department of Ordnance and Transportation, Engineering College of CAPF, Xi'an 710086, China)

**Abstract:** Based on the DC model and the self-heating model of SiC MESFETs, the self-heating effect is investigated in detail. The back-gated effect and its influence on high temperature characteristics are studied. The simulation results show that the activation energy of the traps is 1.07eV with a capture cross section of  $1 \times 10^{-8} \text{ cm}^2$ . The back-gate potential increases as trap concentration increases, and it reaches  $\sim 3\text{V}$  at room temperature. As the drain voltage increases, the back-gate potential decreases. The proposed model is valuable in the design of high-power and high-temperature applications.

**Key words:** SiC; MESFET; self-heating; deep level trap

**PACC:** 2560; 7210; 7250      **EEACC:** 2520M

**Article ID:** 0253-4177(2008)02-0334-04

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60606022) and the Applied Material Innovation Foundation (No. XA-AM-200702)

† Corresponding author. Email: hllv@mail.xidian.edu.cn

Received 21 July 2007, revised manuscript received 14 August 2007

©2008 Chinese Institute of Electronics