

用于电路模拟的 4H-SiC MOSFET 高温 沟道电子迁移率模型

戴振清^{1,2,†} 杨瑞霞¹ 杨克武^{1,3}

(1 河北工业大学, 天津 300130)
(2 河北科技师范学院, 秦皇岛 066600)
(3 中国电子科技集团第十三研究所, 石家庄 050051)

摘要: 提出了适用于电路模拟的 4H-SiC n-MOSFET 高温沟道电子迁移率模型. 在新模型中, 引入了横向有效电场和表面粗糙散射的温度依赖性, 电子饱和漂移速度与横向有效电场和温度的关系, 以及改进的界面陷阱电荷和固定氧化物电荷库仑散射模型等因素. 采用与温度-阈值电压实验曲线拟合的方法, 确定了界面态参数和固定氧化物电荷. 基于新迁移率模型的模拟结果与实验吻合.

关键词: 4H-SiC; n-MOSFET; 阈值电压; 界面态参数; 高温迁移率

PACC: 7340Q; 7360P **EEACC:** 2530F; 2560B

中图分类号: TN304.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2007)08-1252-04

1 引言

Si 在制造高温和大功率器件方面的局限, 迫使人们另外寻找更为合适的材料. 而 SiC 凭借其带隙宽、击穿电场大、热导率高等特点, 在这方面显示出明显的优势, 引起高度关注. 并且, 在所有化合物半导体材料中, 唯有 SiC 能够像 Si 一样被热氧化生成 SiO₂. 因此, 开发高温和大功率用 SiC MOSFET 具有非常大的吸引力, 而且这方面的研究已取得显著进展.

设计电路时为了能够充分利用 4H-SiC n-MOSFET 的优势, 必须构建用于电路模拟的精确有效的紧凑模型(compact model). 而对于 4H-SiC n-MOSFET 的紧凑模型来说, 其中高温沟道电子迁移率模型的建立至关重要. 因为, 目前的 SiO₂/SiC 界面与 SiO₂/Si 界面相比还很不理想, 界面比较粗糙, 存在高密度界面态等不利因素, 因而 SiC MOSFET 的迁移率模型要更复杂一些.

在他人工作的基础上^[1~4], 本文提出了较为理想的适用于电路模拟的 4H-SiC n-MOSFET 高温沟道电子迁移率模型. 在新模型中, 引入了垂直于表面的横向有效电场的温度依赖性, 温度对表面粗糙散射的影响, 以及沟道电子饱和漂移速度与横向有效电场和温度的关系等因素. 并且将 Potbhare 等人最近得到的、更为合理的库仑散射迁移率表达式^[5], 经改进后用于新模型. 将新模型与实验数据结合, 提取

相关参数. 基于新模型的拟合结果与实验符合得很好, 这充分证明了模型的有效性. 本文提出了采用与温度-阈值电压实验曲线拟合, 来确定界面态参数和固定氧化物电荷的新方法, 这种方法相对于 C-V 法更加简单方便.

2 迁移率模型

4H-SiC n-MOSFET 的沟道电子低场迁移率 μ_{LF} 主要包含体散射 μ_B 、表面粗糙散射 μ_{SR} 、表面声子散射 μ_{SP} 、界面陷阱电荷和固定氧化物电荷的库仑散射 μ_C 等机制. 平行于表面的纵向高电场 $E_{//}$ 对电子散射的影响, 用高场迁移率 μ_{HF} 来表示. 因此, 根据 Matthiessen 定则, 总的迁移率 μ_{total} 可表示为

$$\frac{1}{\mu_{total}} = \frac{1}{\mu_{LF}} + \frac{1}{\mu_{HF}} = \frac{1}{\mu_B} + \frac{1}{\mu_{SR}} + \frac{1}{\mu_{SP}} + \frac{1}{\mu_C} + \frac{1}{\mu_{HF}} \quad (1)$$

下面分别详细阐述各种散射机制.

2.1 体迁移率

4H-SiC 体迁移率主要由晶格散射和离化杂质散射决定. Roschke 和 Schwierz 结合已有的实验数据和 Monte Carlo 模拟结果, 基于 Caughey-Thomas 模型得到了 4H-SiC 体迁移率的经验公式^[6]:

$$\mu_B = \mu_{min} + \frac{\mu_{max} - \mu_{min}}{1 + \left(\frac{N_b}{N_{ref}}\right)^{\gamma}} \quad (2)$$

† 通信作者. Email: daizhenqing@126.com

2007-01-19 收到, 2007-03-16 定稿

其中 $\mu_{\min} = 40 \times (T/300)^{-0.5} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$; $\mu_{\max} = 950 \times (T/300)^{-2.4} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$; $N_{\text{ref}} = 2 \times 10^{17} \times (T/300) \text{ cm}^{-3}$; $\gamma = 0.76$; N_b 为衬底掺杂浓度.

2.2 库仑迁移率

库仑迁移率决定于界面陷阱电荷和固定氧化物电荷对沟道电子的散射. Potbhare 等人^[5] 提出了一个较为合理的准二维库仑迁移率模型:

$$\mu_{\text{C0}} = \left(\frac{m^* q^3 (N_f + N_{\text{it}}) F(z)}{16\pi \epsilon^2 \hbar k_B T} \right)^{-1} \quad (3)$$

式中 q 为单位电荷; k_B 为玻耳兹曼常数; m^* 为态密度有效质量; N_{it} 和 N_f 分别为界面陷阱电荷数和固定氧化物电荷数面密度; \hbar 为普朗克常数; ϵ 为 SiO₂ 和 4H-SiC 的介电常数平均值, 形状因子 $F(z)$ 的表达式为:

$$F(z) = \int_0^{\pi/2} \left[1 - \frac{\beta_{\text{sc}}^2}{(8m^* k_B T / \hbar^2) \sin^2 \theta + \beta_{\text{sc}}^2} \right] \times \exp \left[-2 \sqrt{(8m^* k_B T / \hbar^2) \sin^2 \theta + \beta_{\text{sc}}^2} z \right] d\theta \quad (4)$$

其中 θ 为散射角; z 为垂直于表面指向 SiC 体内的坐标(原点在表面处); β_{sc} 为屏蔽长度的倒数, 其值为:

$$\beta_{\text{sc}} = \sqrt{\frac{q^2 N_{\text{inv}}}{\epsilon_{\text{SiC}} Z_{\text{av}} k_B T}} \quad (5)$$

其中 ϵ_{SiC} 为 SiC 的介电常数; N_{inv} 为反型层电子面密度; Z_{av} 为反型层平均厚度, 其值为:

$$Z_{\text{av}} = (Z_{\text{CL}} + Z_{\text{QM}}) \quad (6)$$

式中 Z_{CL} 为经典反型层平均厚度; Z_{QM} 为量子修正. 它们分别为:

$$Z_{\text{CL}} = \frac{3}{2} \times \frac{k_B T}{q E_{\text{eff}}}, \quad Z_{\text{QM}} = \left(\frac{9 \hbar^2}{4 q m_{\perp} E_{\text{eff}}} \right)^{1/3} \quad (7)$$

其中 m_{\perp} 和 E_{eff} 分别为垂直于表面方向的有效质量和横向有效电场, E_{eff} 的表达式为:

$$E_{\text{eff}} = -\frac{1}{\epsilon_{\text{SiC}}} (Q_b + \eta Q_i) \quad (8)$$

其中 Q_b 和 Q_i 分别为耗尽层和反型层电荷面密度; η 是温度的函数^[7,8], 目前还没有文献给出 4H-SiC 中 η 与温度的关系, 设其与 Si 具有相近的规律, 这里暂且采用 Si 的关系式^[8]:

$$\eta = 0.86 - 1.23 \times 10^{-3} T \quad (9)$$

下面将看到, 这样处理是可行的, 并没有对模型的有效性带来太大的影响.

令 $z = Z_{\text{av}}$, 这样就由(3)式得到了适用于电路模拟的一维形式的库仑迁移率表达式:

$$\mu_{\text{C}} = \kappa \left(\frac{m^* q^3 (N_f + N_{\text{it}}) F(Z_{\text{av}})}{16\pi \epsilon^2 \hbar k_B T} \right)^{-1} \quad (10)$$

在(10)式中, 为了使库仑迁移率与实际相符, 特意增加了一拟合参数 κ . 在其他模型中一般含有 2~3 个拟合参数^[4,9], 而(10)式只含一个.

2.3 表面粗糙散射

Lombardi 等人^[10] 给出了表面粗糙散射的迁移率表达式:

$$\mu_{\text{sr}} = \frac{L_{\text{SR}}}{E_{\text{eff}}^2} \quad (11)$$

温度升高时电子动能增加, 使得电子受到表面粗糙影响的散射减弱, 迁移率相应提高^[11,12]. 为了体现温度对表面粗糙散射的影响, 将(11)式改为如下形式:

$$\mu_{\text{sr}} = \frac{L_{\text{SR}}}{E_{\text{eff}}^2} (T/300\text{K})^{\alpha} \quad (12)$$

其中 $(T/300\text{K})^{\alpha}$ 表示温度的影响; α 和 L_{SR} 为拟合参数.

2.4 表面声子散射

表面声子散射的迁移率^[13]为:

$$\mu_{\text{sp}} = \frac{A}{E_{\text{eff}}} + \frac{B}{TE_{\text{eff}}^{1/3}} \quad (13)$$

其中

$$A = \frac{3}{2} \times \frac{\rho_B \hbar^3 v_s^2}{m^* m_c D_{\text{ac}}^2}, \quad B = \frac{q \hbar^3 \rho_B v_s^2}{m^* m_c D_{\text{ac}}^2 k_B} \left(\frac{9 \hbar^2}{4 q m_{\perp}} \right)^{1/3} \quad (14)$$

式中 m_c 为电导有效质量; ρ_B 为 SiC 的体密度; D_{ac} 为声子形变势; v_s 为声速. 理论计算得到 $A = 7.8243 \times 10^7 \text{ cm/s}$, $B = 9.9240 \times 10^6 (\text{V/cm})^{-2/3} \text{ K}/(\text{cm/s})$.

2.5 高场迁移率

电子从平行于表面的纵向高电场 E_{\parallel} 获得能量, 从而与晶格的散射增强, 迁移率降低, 漂移速度趋于饱和. 因此, 高场迁移率可表示为^[9]:

$$\mu_{\text{HF}} = \frac{v_{\text{sat}}(T)}{E_{\parallel}} \quad (15)$$

饱和漂移速度 $v_{\text{sat}}(T)$ 随温度的升高而降低, $v_{\text{sat}}(T)$ 与温度的关系可表示为:

$$v_{\text{sat}}(T) = v_{\text{sat}}(300\text{K}) \left(\frac{T}{300\text{K}} \right)^{-\beta} \quad (16)$$

其中 β 为拟合参数.

横向有效电场 E_{eff} 会影响沟道电子的饱和漂移速度. Gámiz 等人^[14] 通过 Monte Carlo 模拟, 给出了 300K 时 3C-SiC 的电子饱和速度与有效电场 E_{eff} 的关系曲线, 这里通过与该曲线拟合得到了两者间的关系式. 设 4H-SiC 也具有类似的规律, 因而 4H-SiC 的饱和速度和有效电场的关系表示为:

$$v_{\text{sat}}(300\text{K}) = \frac{v_{\text{sat0}}}{\exp(E_{\text{eff}}/C)^{1.2}} \quad (17)$$

其中 $C = 3.8 \times 10^6 \text{ V/cm}$; v_{sat0} 为拟合参数.

3 界面陷阱电荷

3.1 界面态模型

在 SiO_2/SiC 界面,带隙的上半部分为类受主界面态,下半部为类施主界面态.对 n-MOSFET 特性产生影响的主要是上半部分的类受主界面态,其在带隙中的能量分布 $D_{it}(E_T)$ 一般用下式表示

$$D_{it}(E_T) = D_i + D_c \exp[-(E_c - E_T)/\xi] \quad (18)$$

其中 D_i 和 D_c 分别为带隙中央和导带底的界面态密度; ξ 为带尾衰减能量; E_c 和 E_T 分别为导带底和界面陷阱能量.

界面陷阱电荷数面密度的计算式为:

$$N_{it} = \int_{E_i}^{E_F} D_{it}(E_T) dE_T \quad (19)$$

其中 E_F 为费米能级.

3.2 界面态参数和固定氧化物电荷提取方法

阈值电压的表达式为:

$$V_{th} = \phi_{ms} + 2\phi_B + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2\epsilon_{SiC} q N_b (2\phi_B) + \frac{q}{C_{ox}} (N_{it} - N_f)} \quad (20)$$

式中 ϕ_B 为体费米势, $\phi_B = (k_B T/q) \ln(p_{p0}/n_i)$, p_{p0} 为衬底体内空穴浓度, n_i 为本征载流子浓度; C_{ox} 为单位面积栅氧化层电容; ϕ_{ms} 为栅和 4H-SiC 的功函数差,其表达式为:

$$\phi_{ms} = [\chi_{gm} - (\chi_{SiC} + E_g(T)/2 + q\phi_B)]/q \quad (21)$$

式中 χ_{SiC} 和 χ_{gm} 分别为 4H-SiC 和栅金属的电子亲和能, 4H-SiC 带隙 $E_g(T)$ 的表达式为^[15]:

$$E_g(T) = E_g(0) - 6.5 \times 10^{-4} \frac{T^2}{T + 1300} \quad (22)$$

其中 $E_g(0)$ 为 0K 时的带隙. 已知 300K 时的带隙为 3.23eV^[15], 将其代入上式得到:

$$E_g(T) = 3.266 - 6.5 \times 10^{-4} \frac{T^2}{T + 1300} \quad (23)$$

利用(20)式和温度-阈值电压实验曲线的拟合,可以得到界面态参数 D_i , D_c , ξ 以及固定氧化物电荷数面密度 N_f .

4 模拟与分析

4.1 提取界面态参数和固定氧化物电荷

利用(20)式和实验测得的温度-阈值电压曲线(实验曲线来自文献[16])的拟合,得到了界面态相关参数和固定氧化物电荷数面密度,如表 1 所示. 图

表 1 界面态参数和固定氧化物电荷数面密度

Table 1 Interface state parameters and fixed oxide charge density

$D_i/(eV^{-1} \cdot cm^{-2})$	$D_c/(eV^{-1} \cdot cm^{-2})$	ξ/eV	N_f/cm^{-2}
1.0050×10^{11}	2.9939×10^{14}	0.1270	8.6534×10^{11}

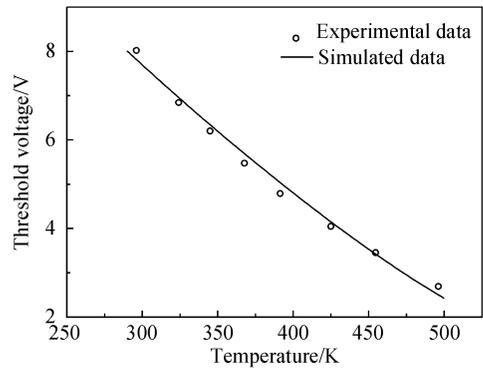


图 1 温度-阈值电压关系曲线

Fig. 1 Threshold voltage varying with temperature

1 为温度-阈值电压曲线,其中实线代表拟合结果,而空心圆表示实验数据.

4.2 迁移率模型参数提取及模型验证

如图 2 所示,将新构建的沟道电子迁移率模型,与实验测得的 425K 时的输出特性曲线进行拟合(实验数据来自文献[16]),得到模型中的相关参数,如表 2 所示.将得到的参数值代入迁移率模型,通过计算得到 325K 和 368K 时的理论输出特性曲线(见图 2),可见与实验数据吻合,这证明了新模型的有效性.

表 2 沟道电子迁移率模型的参数

Table 2 Channel-electron mobility model parameters

κ	$L_{SR}/(V/s)$	α	$v_{sat0}/(cm/s)$	β
0.5798	3.8626×10^{10}	0.5634	1.0006×10^5	0.4491

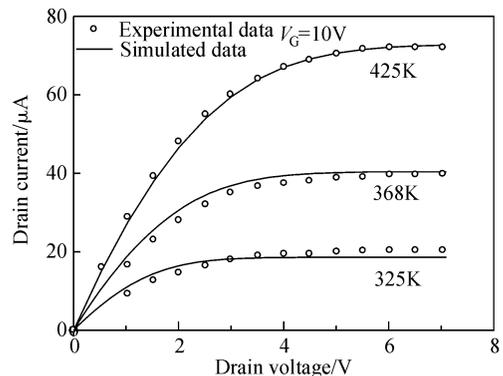


图 2 输出特性曲线

Fig. 2 Output characteristic curves

5 结论

采用与温度-阈值电压实验曲线拟合的方法, 提取了界面态参数和固定氧化物电荷. 构建了用于电路模拟的 4H-SiC n-MOSFET 高温沟道电子迁移率模型, 并提取了模型的相关参数. 基于此模型的模拟结果与实验相符, 证明了此模型的有效性, 因此可以将其用于电路模拟工具之中.

参考文献

- [1] Xu Jingping, Wu Haiping, Li Peitao, et al. Effect of SiO₂/SiC interface on inversion channel electron mobility of 4H-SiC n-MOSFET. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(2):200(in Chinese)[徐静平, 吴海平, 黎沛涛, 等. SiO₂/SiC 界面态对 4H-SiC n-MOSFET 反型沟道电子迁移率的影响. *半导体学报*, 2004, 25(2):200]
- [2] Powell S K, Goldsman N, Lelis A, et al. High-temperature modeling and characterization of 6H silicon carbide metal-oxide-semiconductor field-effect transistors. *J Appl Phys*, 2005, 97:046106-1
- [3] Zeng Y A, White M H, Das M K. Electron transport modeling in the inversion layers of 4H and 6H-SiC MOSFETs on implanted regions. *Solid-State Electron*, 2005, 49:1017
- [4] Pérez-Tomás A, Godignon P, Mestres N, et al. A field-effect electron mobility model for SiC MOSFETs including high density of traps at the interface. *Microelectron Eng*, 2006, 83:440
- [5] Potbhare S, Goldsman N, Pennington G, et al. A quasi-two-dimensional depth-dependent mobility model suitable for device simulation for Coulombic scattering due to interface trapped charges. *J Appl Phys*, 2006, 100:044516-1
- [6] Roschke M, Schwierz F. Electron mobility models for 4H, 6H, and 3C SiC. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48(7):1442
- [7] Huang C L, Goldenblat G S. Measurements and modeling of the n-channel MOSFET inversion layer mobility and device characteristics in the temperature range 60 ~ 300K. *IEEE Trans Electron Devices*, 1990, 37(5):1289
- [8] Cheng B H, Woo J. A temperature-dependent MOSFET inversion layer carrier mobility model for device and circuit simulation. *IEEE Trans Electron Devices*, 1997, 44(2):343
- [9] Powell S K, Goldsman N, McGarrity J M, et al. Physics-based numerical modeling and characterization of 6H-silicon carbide metal-oxide-semiconductor field-effect transistors. *J Appl Phys*, 2002, 92(7):4053
- [10] Lombardi C, Manzini S, Saporito A, et al. A physically based mobility model for numerical simulation of nonplanar devices. *IEEE Trans Comput-Aided Des*, 1988, 7(11):1164
- [11] Ferry D K. Effects of surface roughness in inversion layer transport. *IEDM Technical Digest*, 1984:605
- [12] Chainy K, Huang J H, Duster J, et al. A MOSFET electron mobility model of wide temperature range (77~400K) for IC simulation. *Semicond Sci Technol*, 1997, 12:355
- [13] Potbhare S, Goldsman N, Pennington G, et al. Numerical and experimental characterization of 4H-silicon carbide lateral metal-oxide-semiconductor field-effect transistor. *J Appl Phys*, 2006, 100:044515-1
- [14] Gámiz F, Roldán J B, López-Villanueva J A, et al. Electron velocity saturation in quantized silicon carbide inversion layers. *Appl Phys Lett*, 1996, 69(15):2219
- [15] Levinshtein M E, Rumyantsev S L, Shur M S. Properties of advanced semiconductor materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe. New York: John Wiley & Sons, 2001
- [16] Yano H, Hirao T, Kimoto T, et al. A cause for highly improved channel mobility of 4H-SiC metal-oxide-semiconductor field-effect transistors on the (11 $\bar{2}$ 0) face. *Appl Phys Lett*, 2001, 78(3):374

Temperature-Dependent 4H-SiC MOSFET Channel-Electron Mobility Model for Circuit Simulation

Dai Zhenqing^{1,2,†}, Yang Ruixia¹, and Yang Kewu^{1,3}

(1 Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

(2 Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao 066600, China)

(3 The 13th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: An improved temperature-dependent 4H-SiC MOSFET channel-electron mobility model for circuit simulation is established. Some factors are introduced, including the effects of temperature on transverse effective electric field and surface roughness scattering, the dependence of the saturation drift velocity of the electron on transverse effective electric field and temperature, and an improved interface trapped charge and fixed oxide charge coulomb scattering model. In addition, the interface state parameters and fixed oxide charge density are extracted by simulation with the experimental temperature-threshold voltage curve. The simulated output characteristic curves with this model agree with experimental results.

Key words: 4H-SiC; n-MOSFET; threshold voltage; interface state parameters; temperature-dependent mobility

PACC: 7340Q; 7360P **EEACC:** 2530F; 2560B

Article ID: 0253-4177(2007)08-1252-04

† Corresponding author. Email: daizhenqing@126.com

Received 19 January 2007, revised manuscript received 16 March 2007