

界面态电荷对 n 沟 6H-SiC MOSFET 场效应 迁移率的影响

汤晓燕 张义门 张玉明 郜锦侠

(西安电子科技大学微电子研究所, 西安 710071)

(2001 年 12 月 7 日收到 2002 年 6 月 3 日收到修改稿)

针对界面态密度在禁带中的不均匀分布, 分析了界面态电荷对 n 沟 6H 碳化硅 MOSFET 场效应迁移率的影响. 分析结果显示, 界面态电荷使 n 沟碳化硅器件的场效应迁移率明显降低, 并给出了实验测定的场效应迁移率和反型层载流子迁移率的比值与界面态密度之间关系.

关键词: 碳化硅, 界面态, 反型层迁移率, 场效应迁移率

PACC: 2560R, 7280, 7570, 7850

1. 引 言

碳化硅材料可以通过热氧化工艺在表面获得二氧化硅层, 从而能制成金属-氧化物-半导体场效应 (MOS) 器件. 与硅金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (MOSFET) 相比, 碳化硅 MOS 器件能在更高的温度和电压下工作, 并且有优越的转移特性^[1, 2].

目前 SiC MOSFET 的优势还远未得到发挥, 制约它的主要问题是 SiC/SiO₂ 栅氧化层质量. SiC/SiO₂ 界面态密度与氧化工艺有很大关系, 各种氧化工艺的实验数据显示 p 型碳化硅 MOS 结构的界面态密度明显比硅中的高^[3, 4], 它对 n 沟碳化硅 MOS 器件特性, 特别是对反型层迁移率会产生很大的负面影响. 据报道 n 沟 SiC MOSFET 的表面迁移率不到体迁移率的二分之一^[5]. 处在带隙中的界面态从两个方面影响 MOS 器件的迁移率. 其一, 界面态上俘获的电荷会起到散射中心的作用, 通过库仑力扰乱沟道内的载流子的传输, 降低反型层内可动载流子的平均漂移速度, 也就降低了与平均漂移速度成正比的反型层载流子的迁移率; 另一方面, 由于栅电压的一部分降落在不可动的界面态电荷上, 要改变可动反型层电荷就需要更大的栅压摆动, 使给定栅压下的跨导变差^[6], 从而引起从器件跨导得到的场效应迁移率降低. 以往对 n 沟碳化硅 MOS 迁移率的研究中对前者关注较多, 而对界面态影响场效应迁移率这一方面涉及较少, 常常模糊了反型层迁移率与场效应

迁移率的差别. 本文考虑到界面态密度在禁带中的不均匀分布, 定量描述了在界面电荷的影响下实验测定的场效应迁移率与反型层载流子迁移率之间的关系, 其结果对提高 SiC MOSFET 器件特性有一定指导作用.

2. 物理模型

大多数情况下 MOSFET 反型层迁移率的测量值是从 MOS 器件的传输特性或转移特性曲线在线性区得到的.

从跨导得到迁移率称为场效应迁移率

$$\mu_{fe} = \frac{\frac{\partial I_D}{\partial V_G}}{C_{ox} V_D \frac{W}{L}}, \quad (1)$$

式中 I_D , V_G , V_D , C_{ox} , W , L 分别表示漏电流、栅电压、漏电压、单位面积氧化层电容、栅长和栅宽.

若以上两个迁移率的测量值都取曲线斜率的最大值, 则这两个值基本相等. 在硅器件中可以近似认为这个最大值就等于反型层迁移率, 但对 SiC MOS 器件若仍认为它们等于反型层迁移率等就会给器件模拟带来较大偏差.

在线性区漏电流可以表示成^[7],

$$I_D = \frac{W}{L} \mu_{inv} |Q_{inv}| V_D, \quad (2)$$

式中 μ_{inv} 表示反型层载流子迁移率在沟道中的平均值.

表面薄层电导 $\sigma = \mu_{\text{inv}} |Q_{\text{in}}|$, 这样场效应迁移率可用(3)式计算

$$\mu_{\text{fe}} = \frac{d\sigma}{dV_G} / C_{\text{ox}}. \quad (3)$$

在栅压不高时近似认为 μ_{inv} 为常量, $\frac{d\mu_{\text{inv}}}{dV_G}$ 一项可以略去.

$$\frac{\mu_{\text{fe}}}{\mu_{\text{inv}}} = \frac{1}{C_{\text{ox}}} \frac{d|Q_{\text{inv}}|}{dV_G}. \quad (4)$$

由此可以看出, 场效应迁移率与反型层电荷随栅压的变化斜率有关. 由于受主界面态的存在, 使栅电压的一部分降落在不可动的负界面态电荷上, 要改变反型层电荷就需要比原来更大的栅压摆动, 从而导致场效应迁移率降低. 这样得到的实验值并不是反型层迁移率.

表面反型后栅电压可表示成

$$V_G(V_s) = V_{\text{FB}} - \frac{Q_{\text{inv}}(V_s) + Q_{\text{it}}(V_s) + Q_{\text{dep}}}{C_{\text{ox}}} + V_s, \quad (5)$$

$$\text{平带电压 } V_{\text{FB}} = -V_{\text{ms}} - \frac{Q_{\text{ox}}}{C_{\text{ox}}},$$

式中 $Q_{\text{ox}}, Q_{\text{inv}}, Q_{\text{it}}, Q_{\text{dep}}, V_{\text{ms}}, V_s$ 分别表示单位面积固定氧化物电荷、反型层电荷、界面态电荷、最大耗尽层电荷、功函数差和表面势.

(5)式等号两边对表面势 V_s 求导得到

$$\frac{dV_G}{dV_s} = \left(\frac{d|Q_{\text{inv}}|}{dV_s} + \frac{d|Q_{\text{it}}|}{dV_s} \right) / C_{\text{ox}} + 1, \quad (6)$$

(6)式代入(4)式得到

$$\frac{\mu_{\text{fe}}}{\mu_{\text{inv}}} = \frac{1}{C_{\text{ox}}} \frac{d|Q_{\text{inv}}|}{dV_G/dV_s} = \left(1 + \frac{d|Q_{\text{it}}|/dV_s}{d|Q_{\text{inv}}|/dV_s} + \frac{C_{\text{ox}}}{d|Q_{\text{inv}}|/dV_s} \right)^{-1}, \quad (7)$$

$d|Q_{\text{inv}}|/dV_s = C_{\text{inv}}$ 称为反型层微分电容.

$d|Q_{\text{it}}|/dV_s = q^2 D_{\text{it}}$ 带入(7)式就得到场效应迁移率与平均的反型层迁移率之间的近似关系

$$\frac{\mu_{\text{fe}}}{\mu_{\text{inv}}} = \left(1 + \frac{q^2 D_{\text{it}}}{C_{\text{inv}}} + \frac{C_{\text{ox}}}{C_{\text{inv}}} \right)^{-1}. \quad (8)$$

反型层微分电容 C_{inv} 从弱反型到强反型迅速增大, 在亚阈值场效应迁移率明显比反型层迁移率小.

强反型后 $\frac{C_{\text{ox}}}{C_{\text{inv}}} \rightarrow 0$, 若 $q^2 D_{\text{it}} \ll C_{\text{inv}}$, 则在临界强反型后(阈值附近) μ_{fe} 将很快接近于 μ_{inv} . 硅器件 D_{it} 的量级只有 $10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ 左右, 故从跨导峰值得到的最大的场效应迁移率基本等于反型层迁移率. 而碳化硅

器件的界面态密度较高, 界面电荷对场效应迁移率的影响比较明显.

3. 模拟结果以及与实验的比较

表面空间电荷层电荷面密度 Q_s 和表面势 V_s 的关系可通过求解泊松方程得到. 具体求解方法参照文献[8].

表面反型后反型层电荷可以近似取为表面空间电荷与耗尽层电荷之差

$$Q_{\text{in}}(V_s) = Q_s(V_s) - Q_{\text{dep}}. \quad (9)$$

大量实验数据显示界面态密度在禁带中分布不均匀, 禁带中部的值较低, 靠近导带底呈指数增加^[9], 一般最大与最小值相差一到两个量级. 取文献[10]中的界面态密度分布模型. 在禁带上部态密度取如下分布:

$$D_{\text{it}} = D_{\text{it}0} + D_c e^{-(E_c - E)\xi}, \quad (10)$$

式中 $D_{\text{it}0}$ 为禁带中部界面态密度的最小值, D_c 为导带底界面态密度的最大值, ξ 决定曲线的陡峭程度, $\xi = 0$ 对应界面态在禁带中均匀分布, E_c 表示导带底能级.

n 沟 MOS 反型时, 半导体表面出现负的界面态电荷. 界面态电荷由(11)式计算.

$$Q_{\text{it}} = - \int_{E_i}^{E_F} D_{\text{it}}(E) dE, \quad (11)$$

其中 E_i 表示禁带中部能级.

以下是对 p 型 6H-SiC 衬底 MOS 结构的模拟结果.

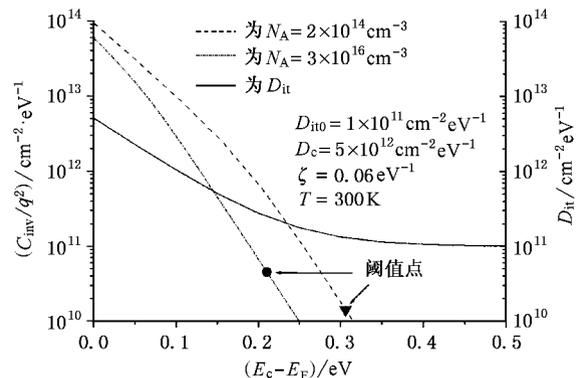


图1 反型层微分电容 C_{inv} 和界面态密度 D_{it} 与表面费米能级 $E_c - E_F$ 的关系

从图1中可以看出, 碳化硅器件要在较大的能

带弯曲下才有可能满足 $q^2 D_{it} \ll C_{inv}$ 相比较而言在高掺杂浓度下,强反型时表面费米能级更接近导带边缘,该处界面态密度相对较大,故界面态对高掺杂衬底的场效应迁移率的影响较明显。

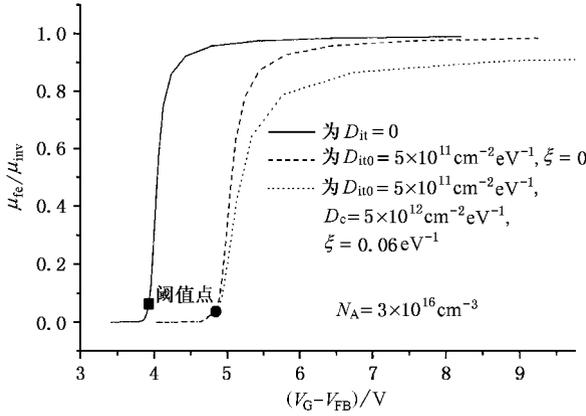


图2 场效应迁移率 μ_{fe} 与反型层迁移率 μ_{inv} 的比值随栅压 $V_G - V_{FB}$ 的变化关系

图2显示平均分布的界面态使上述曲线平移,阈值增大,对在阈值附近测到的场效应迁移率影响不大,不均匀分布的界面态密度对场效应迁移率的影响较明显,场效应迁移率在较大的栅偏压下仍小于反型层迁移率。

若考虑到源漏串联电阻 R_{DS} 对场效应迁移率测量值的影响,

在线性区

$$\begin{aligned} I_D &= \frac{W}{L} \mu_{f0} C_{ox} (V_G - V_T) (V_D - I_D R_{DS}) \\ &= \frac{W}{L} \mu_{fe} C_{ox} (V_G - V_T) V_D, \end{aligned}$$

可推出

$$\mu_{fe} = \frac{\mu_{f0}}{1 + \mu_{f0} R_{DS} C_{ox} (V_G - V_T) W/L}, \quad (12)$$

μ_{f0} 为不考虑串联电阻时的场效应迁移率,

$$\mu_{f0} = \mu_{inv} \left(1 + \frac{q^2 D_{it}}{C_{inv}} + \frac{C_{ox}}{C_{inv}} \right)^{-1}.$$

图3中假设反型层迁移率不随栅电压变化,可以看出界面态的存在使最大的场效应迁移率明显减小,并且达到峰值时的栅电压会受禁带中界面态分布的影响, D_c 与 ξ 越大曲线的峰值将向栅压增大的方向移动,甚至会导致实验中测不到跨导的最大值,给迁移率的测试带来困难。

用上述方法对实验曲线^[11]进行模拟。

反型层迁移率随栅电压变化取经验公式

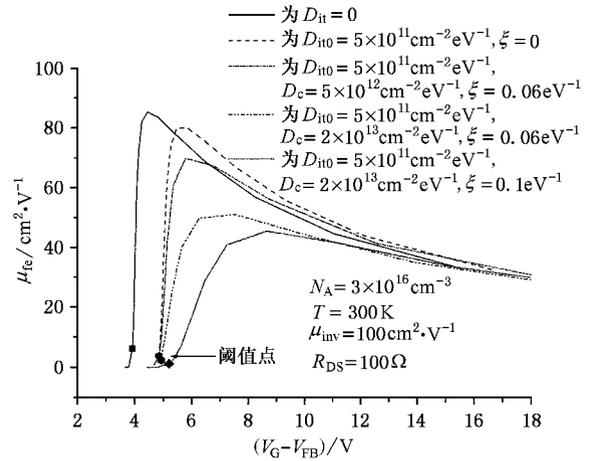


图3 考虑源漏接触电阻的场效应迁移率 μ_{fe} 与栅电压 $V_G - V_{FB}$ 的关系

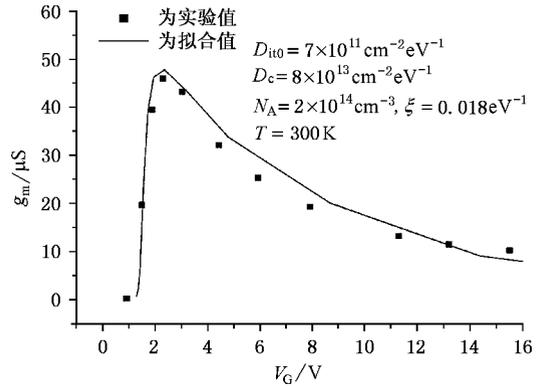


图4 拟和的跨导 g 随栅压 V_G 的变化曲线

$$\mu_{inv} = \frac{\mu_{inv0}}{1 + \theta (V_G - V_T)}, \quad (13)$$

θ 取实验值 0.025 V^{-1} 。

从 SiC MOSFET 亚阈摆幅的测量值中提取的界面态密度,可以近似认为这是 SiC 禁带中部的界面态密度,源漏接触电阻取测量值 75Ω , D_c 与 ξ 是根据跨导曲线得到的拟和值。

从跨导最大值得到的场效应迁移率等于 $54 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 而从拟和结果反推出的反型层迁移率 μ_{inv0} 等于 $75 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

将得到的反型层迁移率带入(2)式模拟转移特性,与实验结果符合得良好。

4. 结 语

本文考虑到界面态在禁带中的不均匀分布,分析了界面态电荷对 n 沟碳化硅场效应迁移率的影响,以及场效应迁移率与反型层迁移率之间的关系。

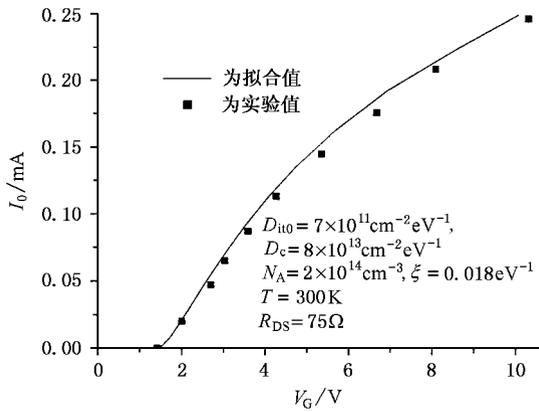


图 5 模拟的转移特性与实验值的比较

在亚阈值场效应迁移率远小于反型层迁移率;强反型后,若 $q^2 D_{it} \ll C_{inv}$, 场效应迁移率近似等于反型层迁移率. 对硅器件在阈值附近测到的最大场效应迁移率基本等于反型层迁移率. 碳化硅器件的界面态密度较高, 导致最大的场效应迁移率明显小于反型层迁移率. 界面态对高掺杂衬底的场效应迁移率的影响较明显. 不仅如此禁带中界面态的分布情况还会影响最大场效应迁移率所对应的栅电压. 所以半导体表面存在着随栅压变化的界面态电荷是制约 n 沟碳化硅 MOS 器件迁移率的主要因素之一, 若能降低界面态密度就有可能明显提高 n 沟碳化硅 MOS 器件的迁移率.

- [1] Neudeck P G 1995 *J. Electron. Mater.* **24** 283
- [2] Xu Ch F and Yang Y T and Liu L 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1113 (in Chinese) 徐昌发、杨银堂、刘 莉 2002 物理学报 **51** 1113]
- [3] Afanas V V , Stesmans A , Bassler M , Pensl G and Schulz M J 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 336
- [4] Sake N S , Mani S S and Agarwal K 2000 *App. Phys. Lett.* **76** 2250
- [5] Saks N S , Mani S S , Agarwal A K and Hegde V S 2000 *Mater. Sci. Forum* **338 - 342** 737
- [6] Vathulya V R and White M H 2000 *IEEE Trans. Electron Dev.* **47** 2018
- [7] Arnold E and Alok D 2001 *IEEE Trans. Electron Dev.* **48** 1870
- [8] Tang X Y and Zhang Y M and Zhang Y M 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 771 (in Chinese) 汤晓燕、张义门、张玉明 2002 物理学报 **51** 771]
- [9] Brown D M 1994 *IEEE Trans. Electron Dev.* **41** 618
- [10] Alok D , Arnold E and Egloff R 2000 *Mater. Sci. Forum* **338 - 342** 1077
- [11] Schorner R , Friedrichs P and Peters D 1999 *IEEE Trans. Electron Dev.* **46** 533

Study of the effect of interface state charges on field-effect mobility of n-channel 6H-SiC MOSFET

Tang Xiao-Yan Zhang Yi-Men Zhang Yu-Ming Gao Jin-Xia

(Microelectronic Institute , Xidian University , Xi ' an 710071 , China)

(Received 7 December 2001 ; revised manuscript received 3 June 2002)

Abstract

The effect of interface state charges on the field-effect mobility of n-channel 6H-SiC MOSFET is analyzed based on the non-uniform distribution of interface state density in the energy gap. The results of the analysis show that interface state charges have the influence of lowering the field-effect mobility in n-channel SiC MOSFET. A relationship has been established between the ratio of the experimentally determined field-effect mobility to the inversion-layer carrier mobility and interface states.

Keywords : silicon carbide , interface state , inversion-layer mobility , field-effect mobility

PACC : 2560R , 7280 , 7570 , 7850