

电子俘获对 φ_b 和热电子流的影响

李 肇 基

(成都电讯工程学院)

1984年9月26日

本文从泊松方程出发,考虑了二氧化硅中电子俘获的影响,导出硅-二氧化硅界面的势垒高度。还得出了包含电子俘获作用的栅电流随时间变化的关系式。由此关系式及 φ_b 表达式推得热电子衬底电流与栅电流之间的解析表达式,从而解释了在栅电流较大的情况下此两电流之间的非线性对数关系。

一、引 言

T. H. Ning 得出了硅-二氧化硅界面的势垒高度 φ_b 的重要公式^[1],但该公式并未涉及电子俘获作用对 φ_b 的影响。本文从泊松方程出发,考虑二氧化硅中电子的俘获作用,导出了包含肖特基镜像力、隧道效应以及电子俘获三者作用的硅-二氧化硅界面的势垒高度 φ_b 的表达式。

本文还利用上述结果对热电子流进行了讨论。短沟 MOS 器件中有四种类型的热载流子,即沟道热电子 (CHE),衬底热电子 (SHE),漏极雪崩热载流子 (DAHC) 和二次产生热电子 (SGHE)。热载流子效应不仅影响到器件的电特性,且波及到器件跨导的退化和阈值电压的漂移^[2-6]。这一问题已成为影响超大规模集成电路稳定性的关键因素。因此对热电子效应的深入分析是十分重要的。近来有些作者^[2-3]讨论了热电子衬底电流与栅电流之间的关系。他们在忽略了二氧化硅中电子俘获作用的情况下,得出此两电流间的对数线性关系的公式。但是他们发现,在注入栅电流较大时,此两电流之间的对数关系偏离线性。本文在导出上述 φ_b 的表达式后,又导出由于电子俘获作用使栅电流随时间而变化的关系式,利用这两项关系,得出了考虑电子俘获作用的衬底热电子流与栅电流之间的解析式,从而解释了文献[2]和[3]中所出现的结果。

二、电子俘获对 φ_b 的影响

在短沟 MOS 管中,由于沟道中强电场的作用,部分沟道电子将获得足够的能量,克服硅-二氧化硅界面的势垒,注入二氧化硅中,如图 1 所示。设电子注入表面为硅表面,二氧化硅中电子俘获中心密度为 $N_t(x)$,在 $0 \leq x \leq T_{ox}$ 的条件下,求解下列一维泊松方程:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon_{ox}} N_t(x). \quad (1)$$

其边界条件为:

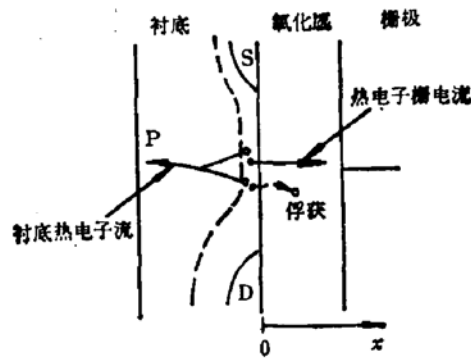


图1 热电子发射示意图

$$\begin{cases} V(0) = 0 \\ V(T_{ox}) = V_G - W_{ms} \end{cases} \quad (2)$$

其中 T_{ox} 为二氧化硅层厚度, W_{ms} 为栅极与 n^+ 源漏间功函数差, 利用文献[7], 求得方程(1)的解为:

$$V(x) = E_{0x}x - \frac{q}{\epsilon_{0x}} \left[\frac{x}{T_{ox}} \int_0^{T_{ox}} x' N_i(x') dx' - x \int_x^{T_{ox}} N_i(x') dx' - \int_0^x x' N_i(x') dx' \right] \quad (3)$$

在 $x = x_m$ 处的电场值为:

$$\begin{aligned} E(x_m) &= E_{0x} - \frac{q}{\epsilon_{0x}} \left[\int_0^{T_{ox}} \frac{x'}{T_{ox}} N_i(x') dx' - \int_{x_m}^{T_{ox}} N_i(x') dx' \right] \\ &= E_{0x} - \Delta E_{0x} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 x_m 为势垒最高处与发射表面的距离, 其值为:

$$x_m = \left[\frac{q}{16\pi\epsilon_i E(x_m)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

其中 ϵ_i 为镜像力介电常数, 其值为 2.2, $E_{0x} = (V_G - W_{ms})/T_{ox}$, 为未计及电子俘获时二氧化硅中的电场强度^[1]. 而

$$\Delta E_{0x} = \frac{q}{\epsilon_{0x}} \left[\int_0^{T_{ox}} \frac{x'}{T_{ox}} N_i(x') dx' - \int_{x_m}^{T_{ox}} N_i(x') dx' \right] \quad (4')$$

表示由于电子俘获的作用, 在二氧化硅中产生的附加电场. 将(4)式和(5)式代入(3)式, 得到 $x = x_m$ 处的电势为:

$$V(x_m) = \left[\frac{q}{16\pi\epsilon_i} E(x_m) \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{q}{\epsilon_{0x}} \int_0^{x_m} x' N_i(x') dx' \quad (3')$$

从文献[7]中可得到硅-二氧化硅界面的势垒高度为:

$$q\varphi'_b = q \left[V(x_m) + \frac{\beta}{2} E(x_m)^{\frac{1}{2}} + \alpha E_{0x}^{\frac{1}{2}} \right] \quad (6)$$

式中最后一项是由于隧道效应所引起的势垒高度变化^[1]. 常数 $\beta = (q/4\pi\epsilon_i)^{\frac{1}{2}} = 2.59 \times 10^{-4} [cm - v]^{\frac{1}{2}}$, $\alpha = 10^{-5} [cm^2 - v]^{\frac{1}{2}}$. 将(3')式和(3)式代入(6)式, 且只取 $E(x_m)^{1/2}$ 展开式前两项, 则我们可得:

$$q\varphi'_b = q(\beta E_{ox}^{\frac{1}{2}} + \alpha E_{ox}^{\frac{2}{3}} - \Delta\varphi_b). \quad (7)$$

式中

$$\Delta\varphi_b = \frac{Q_0}{\epsilon_{ox}} \left\{ \frac{\beta}{2} E_{ox}^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{\langle x_1 \rangle}{T_{ox}} - F(x_m) \right] - \langle x_2 \rangle [1 - F(x_m)] \right\}, \quad (8)$$

$$Q_0 = q \int_0^{T_{ox}} N_t(x') dx',$$

$$F(x_m) = \frac{\int_{x_m}^{T_{ox}} N_t(x') dx'}{\int_0^{T_{ox}} N_t(x') dx'},$$

$$\langle x_1 \rangle = \frac{\int_0^{T_{ox}} x' N_t(x') dx'}{\int_0^{T_{ox}} N_t(x') dx'},$$

$$\langle x_2 \rangle = \frac{\int_0^{x_m} x' N_t(x') dx'}{\int_0^{x_m} N_t(x') dx'}.$$

这里, $\Delta\varphi_b$ 表示由于二氧化硅中电子俘获作用使硅-二氧化硅间势垒高度所产生的变化, Q_0 表示二氧化硅中总的俘获电荷密度, $F(x_m)$ 表示从 x_m 到 T_{ox} 间俘获的电荷量占总的俘获电荷量的分数, $\langle x_1 \rangle$ 表示从发射原点到 T_{ox} 间俘获电荷的分布权重, $\langle x_2 \rangle$ 表示从发射原点到 x_m 间俘获电荷的分布权重. $q\varphi'_b$ 则表示了肖特基镜像力、隧道效应及电子俘获三者的作用使硅-二氧化硅间势垒高度发生的变化. 在正常情况下, 硅-二氧化硅间势垒高度为 3.2 eV. 因此, 由于上述三者的作用, 使硅-二氧化硅间势垒高度变为: $q\varphi_b = q(3.2 - \varphi'_b)$. 将(7)式代入, 则得:

$$q\varphi_b = q\varphi_{b0} + q\Delta\varphi_b. \quad (9)$$

其中 $\varphi_{b0} = 3.2 - \beta E_{ox}^{\frac{1}{2}} - \alpha E_{ox}^{\frac{2}{3}}$ 与 T. H. Ning^[1] 得出的硅-二氧化硅间势垒高度的表达式完全相同. 这就是说, 本文从泊松方程出发导出的势垒高度公式, 在忽略了二氧化硅中的电子俘获时, 是与 T. H. Ning 的表达式一致的. 因此, $\Delta\varphi_b$ 表示了二氧化硅中电子俘获对 φ_b 影响, 其值与二氧化硅中电子俘获中心密度 $N_t(x)$ 、氧化层厚度、氧化层中电场强度有关. 显然, 从公式(8)看出, 在诸因素中, 总的俘获中心数 Q_0 对 $\Delta\varphi_b$ 影响最大. 同时从公式(9)看出本文与 T. H. Ning 得出的 φ_b 值的不同点在于后者未考虑电子俘获对硅-二氧化硅界面势垒高度的影响.

三、电子俘获对热电子流的影响

众所周知, 衬底热电子流不受电子俘获的影响, 其值为^[2]:

$$I_{sb} = 2I_d \exp \left(-\frac{1.7 \times 10^6}{E_m} \right). \quad (10)$$

其中 I_d 为源漏之间的电流, E_m 为沟道中最大电场. 但是沟道热电子注入到二氧化硅中

并向栅极运动而构成的栅电流却与二氧化硅中电子俘获有关。随着俘获电荷的增加, 被俘获的电子所产生的电场阻止沟道热电子继续向二氧化硅中注入, 使栅电流不按比例地增加。设热电子为 Maxwellian 分布, 且此分布与栅压无关。用一维分析近似^[9], 可得出栅电流随时间变化的关系为:

$$I_g = \frac{I_{g0}}{1 + \frac{I_{g0}}{I_{cr}}} \quad (11)$$

而

$$I_{cr} = \theta \frac{E}{\eta_i t}$$

其中 I_g 为实际栅电流, I_{g0} 为没有考虑电子俘获时的栅电流, E 为沟道横向电场, 可根据文献[2]计算, η_i 为俘获系数, 测得为 4×10^{-3} , θ 为根据文献[9]计算的数值, 其值为 8.7×10^{-20} 法拉·厘米, t 为测量时间。图 2 是根据公式(11)作出的在不同测试时间内 I_g 与 I_{g0} 的关系曲线。从图中看出, 如果测试条件不变, 实际栅电流, 即考虑了电子俘获时的栅电流与没有考虑电子俘获的栅电流之差是随初始电流的增加而增大; 另一方面, 如初始栅电流不变, 则实际栅电流将随测试时间的增长而减小。这是由于发射电子的一部分将被氧化中的俘获中心俘获, 这种被俘获中心俘获的电荷将产生排斥电子继续注入的拒斥场。俘获中心愈多, 测试时间愈长, 被俘获电荷的电荷也增多, 因而排斥电子继续注入的电场也随之增加, 从而使栅电流不是按比例增加。当考虑了由于热电子的注入而产生的受主型界面态时^[6], 这种现象将会更加显著。

对于沟道热电子注入二氧化硅中所产生的栅电流, 文献[2]分析了这一运动的三个过程, 但没有考虑在此运动中热电子被二氧化硅中俘获中心俘获的过程。图 3 表示了包括俘获过程在内的热电子运动的四个过程。即 a, 电子从沟道电场获得足够的能量向界面发射的过程, 其发射几率用 P_1 表示; b, 电子从硅-二氧化硅界面的硅一侧向界面运动的过程, 电子在运动过程中将损失部分能量, 其达到界面的几率为 P_2 ; c, 电子在硅-二氧化硅的二氧化硅一侧的镜像势阱中向最高势垒处 x_m 运动的过程, 其不遭受散射的几率为 P_3 ; d, 电子在向栅极运动的路途中遭受俘获中心俘获的过程。在此运动过程中, 热电子就在二氧化硅中的电场 E_{ox} 及俘获电荷产生的电场 ΔE_{ox} 的联合作用下向栅极运动, 其未被俘获的几率为:

$$P_4 = \exp(-\Delta\varphi_b/\lambda E). \quad (12)$$

其中 λ 为电子的平均自由程。俘获中心俘获电荷后将产生阻止沟道热电子继续注入的拒斥场, 且随俘获电荷的增多而增大^[9], 这就相当于增加势垒高度 $q\Delta\varphi_b$, 减少热电子向二氧化硅中注入并向栅极传输, 使传输几率 P_4 减小, 因而使栅电流随之减小。俘获中心的负电荷将使 p-MOS 管的沟道电流增加; 对 n-MOS 管, 接近漏端的电子俘获将对沟道电

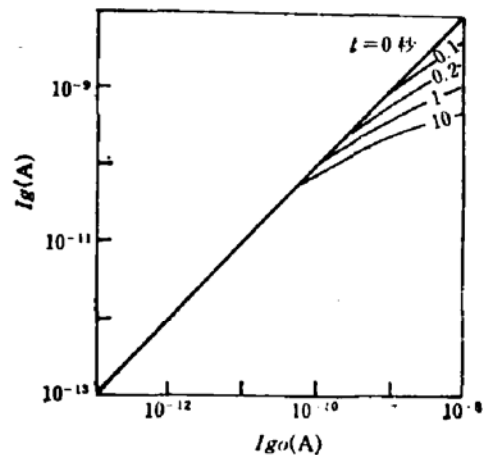


图2 I_g 与 I_{g0} 的关系曲线

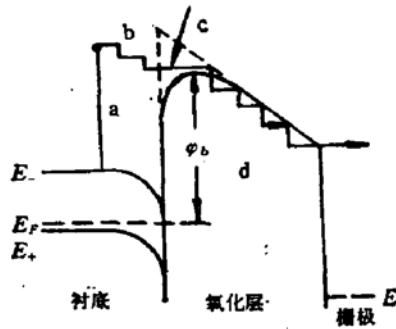


图3 包括电子俘获的热电子模型

子流产生瓶颈效应,减少 N-MOS 管中的沟道电子流^[8]. 这可以从液氮温度下 N-MOS 管的电特性得到证实. 因为在此温度下,只有俘获的热电子电荷才是唯一的负电荷源. 这种电子的俘获过程将受到两个因素的限制,a,随着时间的增长,俘获过程逐渐接近饱和;b,沟道电子的发射数量逐渐减少.

在考虑电子的俘获过程后,仅仅包含前三个过程的栅电流表示式^[3]变为:

$$I_g = \frac{I_{de}}{\lambda} \int_0^{\Delta L} P_1 P_2 P_3 P_4 dx$$

$$= K_1 I_{de} \exp[-(\phi_{b0} + \Delta\phi_b)/1.3]. \quad (13)$$

式中 ΔL 为沟道调制长度, K_1 为与 E_{ox} 有关的常数. 当 $E_{ox} = 10^6 \text{ V/cm}$ 时, $K_1 = 4 \times 10^{-3}$. 从公式(10),(11)及(13)式,可得到衬底热电子流与栅电流之间的关系式

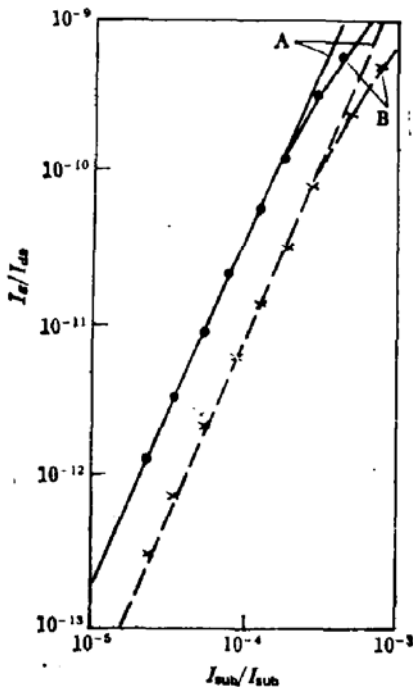


图4 衬底热电子流与栅电流之间的关系

A: $E_{ox} = 3 \times 10^5 \text{ V/cm}$,

B: $E_{ox} = 1 \times 10^5 \text{ V/cm}$

$$\frac{I_g / (1 + \frac{I_g}{I_{de}})}{I_{de}} = K \left(\frac{I_{sub}}{I_{de}} \right)^{(\phi_{b0} + \Delta\phi_b)/1.3} \quad (14)$$

式中 $K = 0.2K_1$. 图4作出这两电流间的理论关系曲线及实验结果,其中曲线B是根据公式(14)计算值作出的. 在计算时我们分别考虑了二氧化硅中的电子俘获中心的两种分布,即均匀分布和指数式分布. 由于一般情况下 x_m 远小于 T_{ox} ,且在指数分布情况下,如 $x = T_{ox}/2$ 处的俘获中心密度 $N(T_{ox}/2)$ 是在 $x = 0$ 处的俘获中心密度 $N(0)$ 的 $1/e$ 倍左右变化,则此两种分布的 $\Delta\phi_b$ 值几乎相同. 曲线A是没有考虑电子俘获作用的情况下的结果. 被测试的 N-MOS 管用常规硅栅工艺制作, MOS 管的沟道长度为 0.94 微米,沟道宽度为 89 微米. 测试时利用调整栅极电位以改变二氧化硅层的电场强度 E_{ox} . 分别在 $E_{ox} = 3 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 和 $1 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 下进行测量. 二氧化硅内俘获中心密度为 $1.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. 从图中看出,二氧化硅内电场 E_{ox} 愈低,衬底热电子流与栅电流之间愈偏离线性对数关系,这时电子的俘获作用逐渐增大. 从图中还看出,在计及了二氧

化硅内电场 E_{ox} 愈低,衬底热电子流与栅电流之间愈偏离线性对数关系,这时电子的俘获作用逐渐增大. 从图中还看出,在计及了二氧

化硅中电子的俘获以及这种俘获随时间变化关系后, 衬底热电子流与栅电流之间的对数关系偏离线性, 且随栅流增加, 这种偏离现象愈加显著。但当栅流小于 $10^{-11} A$, 且测试时间较短时, 使 $I_{g0}/I_{cr} \approx 0$, $I_g \approx I_{g0}$, 在这种情况下(14)式变为:

$$\frac{I_g}{I_{ds}} = K \left(\frac{I_{sub}}{I_{ds}} \right)^{(\varphi_{b0} + \Delta\varphi_b)/1.3}. \quad (15)$$

两电流之间的对数关系是准线性的。如果 MOS 管中栅氧化层厚度很薄或氧化层中俘获中心很少, 使 $\Delta\varphi_b \approx 0$, 即略去电子的俘获作用, 则有:

$$\frac{I_g}{I_{ds}} = K \left(\frac{I_{sub}}{I_{ds}} \right)^{\varphi_{b0}/1.3}. \quad (16)$$

两电流之间的对数关系呈线性变化。我们看出这与文献[2]中的关系式完全相同, 也就是说, 文献[2]中的衬底热电子流与栅电流之间的关系式是在忽略了二氧化硅中的电子俘获以及这种俘获随时间的变化关系的情况下导出的。

四、结 论

本文从泊松方程出发, 并考虑了二氧化硅中电子俘获的影响, 导出硅-二氧化硅间势垒高度为 $\varphi_b = \varphi_{b0} + \Delta\varphi_b$, 其中 $\Delta\varphi_b$ 表示电子俘获对势垒高度的影响。而 φ_{b0} 正好与 T. H. Ning^[1] 得出的势垒高度表达式相同。这是因为本文考虑的是肖特基势垒力、隧道效应及电子俘获三者的作用, 而 T. H. Ning 只考虑了前两个因素的影响。

本文还导出由于电子俘获作用使栅电流随时间变化的关系式。利用上述两个表达式, 得出衬底热电子流与栅电流之间的关系式。根据二氧化硅中俘获中心的多少, 注入栅电流的大小及测量时间的长短, 两电流之间的对数关系可能是非线性的、准线性的或线性的。俘获中心愈多, 注入栅电流越大, 测量时间愈长, 则两电流之间的对数关系愈偏离线性。这就解释了文献[2]和[3]中的在较大的注入栅电流下两电流之间的关系呈非线性的原因, 这也就解释了在不同的工艺、不同测试条件下所得到的此两电流之间的关系不完全相同。

感谢毛钧业教授阅稿指导和 H. L. Wiederspahn 的协助。

参 考 文 献

- [1] T. H. Ning, *Solid-State Electron.*, **21**, 273 (1978).
- [2] S. Tam et al., *IEEE Trans. Electron Device*, **ED-29**, 1740 (1982).
- [3] S. Tam et al., *IEEE Electron Device Letter*, **EDL-4**, 249 (1983).
- [4] C. Hu, in *IEDM Tech. Dig.*, **22** (1979).
- [5] P. K. Ko et al., in *IEDM Tech. Dig.*, **60** (1981).
- [6] C. Hu et al., *IEEE Trans. Electron Device*, **ED-32**, 375 (1985).
- [7] E. H. Nicollian et al., "MOS Physics and Technology", 1982.
- [8] K. K. Ng et al., *IEEE Trans. Electron Device*, **ED-30**, 871 (1983).
- [9] P. E. Cottrell et al., *IEEE Trans. Electron Device*, **ED-26**, 520 (1979).

Effect of Electron Trapping on φ_b and Hot-Electron Current

Li Zhaoji

(Chengdu Institute of Radio Engineering)

Abstract

From the solution of Poisson equation in the oxide, the barrier energy height between silicon and silicon dioxide interface is derived taking the effect of electron trapping into account. With this result and the dependence of the gate current with the effect of electron trapping on the gate current, the correlation between substrate and gate hot-electron current at larger gate current is explained.