

反向衬底偏压下纳米 N 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管中栅调制界面产生电流特性研究*

陈海峰†

(西安邮电大学电子工程学院, 西安 710121)

(2013年4月25日收到; 2013年5月8日收到修改稿)

研究了反向衬底偏压 V_B 下纳米 N 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管中栅调制界面产生 (GMG) 电流 I_{GMG} 特性, 发现 I_{GMG} 曲线的上升沿与下降沿随着 $|V_B|$ 的增大向右漂移. 基于实验和理论模型分析, 得出了 V_B 与这种漂移之间的物理作用机制, 漂移现象的产生归因于衬底偏压 V_B 调节了表面电势 ϕ_s 在栅电压 V_G 中的占有比重: $|V_B|$ 增大时相同 V_G 下 ϕ_s 会变小, ϕ_s 的变化继而引发上升沿产生率因子 g_r 减小以及下降沿产生率因子 g_f 增大. 进一步发现 I_{GMG} 上升沿与下降沿的最大跨导 G_{MR} , G_{MF} 在对数坐标系下与 V_B 成线性关系, 并且随着 $|V_B|$ 增加而增大. 由于漏电压 V_D 在 I_{GMG} 上升沿与下降沿中的作用不同, 三种 V_D 下 $G_{MR}-V_B$ 曲线重合而 $G_{MF}-V_B$ 曲线则产生差异. 增大 V_D 会增强 g_f 随 V_G 的变化, 因此使得给定 V_B 下的 G_{MF} 变大. 同时这却导致了更大 V_D 下 $G_{MF}-V_B$ 曲线变化的趋势减缓, 随着 V_D 从 0.2 V 变为 0.6 V, 曲线的斜率 s 从 0.09 减小到 0.03.

关键词: 产生电流, 表面势, 衬底偏压, N 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管

PACS: 85.30.De, 85.30.Tv

DOI: 10.7498/aps.62.188503

1 引言

互补金属氧化物半导体 (CMOS) 器件中的栅调制界面产生 (gate-modulated generation, GMG) 电流 I_{GMG} 是在栅控漏 PN 结反偏的情形下, 沟道界面陷阱充当 shockley-read-hall (SRH) 产生中心而形成的一种漏极泄漏电流. 由于 GMG 电流具有对陷阱极其敏感的特性, 近年来它已被广泛地应用于纳米 CMOS 器件工艺的监控及器件相关可靠性等重要的研究领域. Chang 等^[1] 使用 GMG 电流研究了新型的高 K 栅介质 $LaAlO_3$ 的界面特性, 并提取出了陷阱的界面产生 - 复合速率; Cheng 等^[2] 研究了 45 nm CMOS 中 SiGe 工艺下 P 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管 (pMOSFET) 的源和漏区应力所产生的陷阱对 GMG 电流的影响, 以此发现了器件沟道、漏扩展区和漏区界面处陷阱的形成机制; Zhang 等^[3] 则对绝缘硅 Fin 场效应管 (SOI

Fin FET) 的不同 Fin 宽度和栅长度下的 GMG 电流进行了细致的研究; Pan^[4] 研究了先进垂直沟槽功率 MOSFET 中的 GMG 电流, 发现漏外延掺杂越高会导致 GMG 电流增大; Yang 等^[5] 研究了具有高 k 栅介质的 Fin FET 中的温度偏压 (BT) 应力产生的陷阱对 GMG 电流特性的影响; Mori 等^[6] 发现 MOSFET 漏 PN 结反偏下形成的动态结泄漏归因于栅中陷落的空穴引起了界面 GMG 电流涨落; 此外, 由于辐照能造成器件界面陷阱损伤^[7], GMG 电流因此也被作为有效的表征手段来研究 CMOS 器件辐照引发的器件的退化特性及抗辐照的工艺加固技术^[8-11].

尽管已经开展了大量有关 GMG 电流的研究工作, 但是 GMG 特性仍然未被完全理解. 上述的研究中只是应用了无衬底偏压下的 GMG 电流, 并未涉及衬底偏压下的 GMG 电流. GMG 电流产生于沟道非平衡状态下的耗尽区, 而衬底反向偏压可以增

* 陕西省教育厅科学研究计划 (批准号: 2013JK1095) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: chenhaifeng@xupt.edu.cn

加沟道的这种非平衡程度. 通过改变衬底反向偏压, 可使得界面陷阱的产生效应被加强或减弱, 从而可更全面和深入地研究纳米 CMOS 器件中 GMG 相关的可靠性问题, 因此研究衬底反偏下的 GMG 电流特性具有重要意义. 然而, 目前衬底反偏压下的 GMG 电流特性的研究却较少.

本文对 90 nm CMOS 工艺下栅氧厚为 4 nm LDD-nMOSFET 中反向衬底偏压 V_B 下 GMG 电流 I_{GMG} 特性进行了研究. 通过分析不同漏电压 V_D 下的 I_{GMG} 随 V_B 的变化曲线以及引入了 I_{GMG} 跨导 G , 深入研究了衬底反向偏压 V_B 与 I_{GMG} 之间的关系, 建立了相关理论模型, 并详细阐述了 V_B 调制 I_{GMG} 的物理机制.

2 GMG 电流形成的物理机制及实验

GMG 电流 I_{GMG} 源自于器件沟道界面陷阱, I_{GMG} 可表示为^[12]

$$I_{GMG} = AqN_{it}\sigma v_{th}g, \quad (1)$$

式中 A 为栅下面的产生面积, N_{it} 为界面陷阱密度, q 为电子电量, σ 为陷阱俘获界面, v_{th} 为电子速度, g 为陷阱的产生率因子.

从(1)式中看出, I_{GMG} 和 g 成正比. 对于 nMOSFET, 漏电压 V_D 大于 0 时, 漏 PN 结即获得反偏. g 可表示为^[12,13]

$$g = \frac{n_i^2 - n_s p_s}{n_s + p_s + 2n_i} = \frac{n_i^2 [1 - \exp(-qV_D/kT)]}{n_s + p_s + 2n_i}, \quad (2)$$

其中 n_s 和 p_s 为界面处电子和空穴浓度. 在室温下, 若 $V_D > 0.06$ V 时, $\exp(-qV_D/kT) < 0.1$, 可认为 $\exp(-qV_D/kT) \ll 1$, 则 g 可简化为

$$g = \frac{n_i^2}{n_s + p_s + 2n_i}. \quad (3)$$

该电流随着栅压 V_G 的变化而变化: 当器件沟道积累状态时, 这些陷阱被空穴占据, g 为 0, I_{GMG} 为 0; 当 V_G 大于平带电压 V_{FB} , 沟道开始进入耗尽状态时, 陷阱产生中心开始被激活, g 开始增大, I_{GMG} 形成并增大; 而当栅压继续增加进入沟道弱反型状态时, 沟道内电子急速增大并开始占据陷阱中心, g 开始变小导致 I_{GMG} 开始减小; 当 V_G 超越阈值电压 V_T 时, 沟道进入到反型状态时, 沟道载流子占据了陷阱而屏蔽了产生作用, g 变为 0, I_{GMG} 消失. 因此, I_{GMG} 曲线随着栅压的变化呈现了驼峰形状.

本实验器件为 90 nm CMOS 工艺下 LDD nMOSFET, N^+ 多晶硅栅电极, 栅氧化层厚度为 $T_{OX} = 4$ nm, 栅长 L_G 为 0.28 μm , 栅宽度 W 为 6 μm . 测试条件为: 源端悬浮, 栅电压 V_G 从器件沟道的积累区一直扫描到反型区 (-0.4 V $< V_G < 1.0$ V), 同时漏电压 V_D 分别取 0.2, 0.4, 0.6 V, 每种 V_D 下, 反向衬底偏压 V_B 分别从 0, -0.2 , -0.4 , -0.6 , -0.8 V 变化到 -1.0 V, 这时所测得的漏极电流即为 GMG 电流 I_{GMG} . 室温下, 为了避免光照以及外界因素对测试的影响, 器件置于防震的暗箱环境中, 测试用 Keithley 4200 半导体参数分析仪, 其电流最小精度可达 10^{-16} A.

3 结果与讨论

图 1 为 $V_D = 0.2, 0.4, 0.6$ V 下测试的 I_{GMG} 随衬底偏压 V_B 的变化曲线. 图中, 随着 V_B 从零偏到反偏, 电流曲线向正栅压方向漂移, 其中上升沿和下降沿向右漂移. 如前所述, I_{GMG} 上升沿的起点即为平带电压 V_{FB} 点, 但是 V_{FB} 只与功函数差和氧化层电荷有关^[14], V_B 并不能影响 V_{FB} , 因此曲线上升沿向右移动并不是 V_{FB} 变化造成的. 图 1 中上升沿出现在沟道刚进入到耗尽区时, 这时沟道内的电子浓度非常少, 由于漏电压 V_D 的作用加载在沟道的耗尽层上非常微弱, 其对沟道内的耗尽层的影响可忽略. 而 V_B 在这一阶段是直接加载在衬底上, 因此 V_B 应该对 GMG 电流起到主要的调节作用, 它使得沟道耗尽区进入非平衡状态. 为了验证上述假设, 图 2 将图 1 中三种 V_D 下的 GMG 电流曲线放在一起进行比较. 图中发现了每种 V_B 下, 三种 V_D 下的 I_{GMG} 曲线在上升沿都重合在一起, 这一结果说明了假设中上升沿时 V_D 可忽略而 GMG 电流主要由 V_B 来主导的物理机制是合理的.

由于器件中空穴为衬底多子, 在 V_B 的影响下沟道中的空穴的费米能级 E_{FP} 仍然保持不变. 而电子的费米能级 E_{FN} 则下降非常明显, 因此施加了衬底偏压 V_B 将使得 E_{FN} 又降低 $-qV_B$. 于是界面空穴浓度 p_s 也就基本不变, 电子的准费米能级 E_{FN} 直接影响着界面电子浓度 n_s , 于是 n_s 变成了 V_B 的函数 $n_s(V_B)$. 即 V_B 变化就能引发 n_s 的变化. I_{GMG} 曲线上升沿时, 忽略 V_D 的影响下, n_s 和 p_s 可表示为

$$n_s(V_B) = n_0 \exp(q(\phi_s + V_B)/kT), \quad (4)$$

$$p_s = p_0 \exp(-q\phi_s/kT), \quad (5)$$

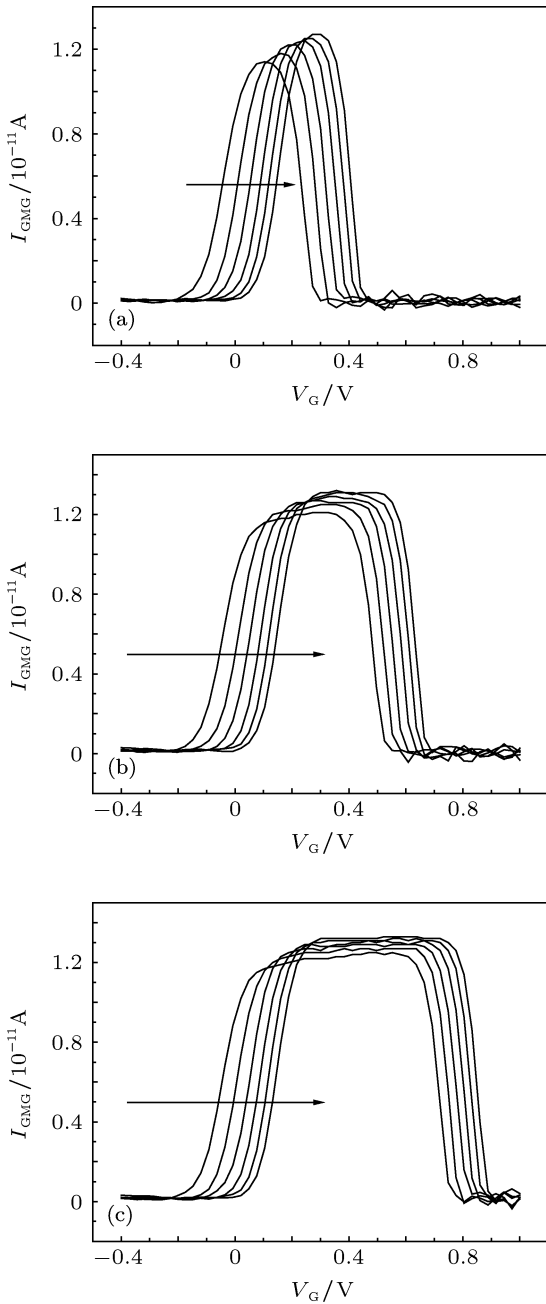


图1 三种 V_D 下不同 V_B 下的 I_{GMG} - V_G 曲线 (a) $V_D = 0.2$ V; (b) $V_D = 0.4$ V; (c) $V_D = 0.6$ V; $V_B = 0, -0.2, -0.4, -0.6, -0.8, -1.0$ V

其中 p_0, n_0 分别为衬底平衡时空穴和电子浓度, φ_s 为表面电势.

则上升沿的 g 因子, g_r 为

$$g_r = \frac{n_i^2}{n_s(V_B) + p_s + 2n_i} \quad (6)$$

由于 $p_0 \gg n_0$, 在上升沿时耗尽层内有 $p_s \gg n_s$. 因此尽管 n_s 随反偏 V_B 的变化剧烈, 但是对 g_r 起决定作用的还是 p_s .

(5) 式表明, p_s 与表面势 φ_s 密切相关. 由前所述器件给定时, V_{FB} 并不影响 V_B 调制下的 GMG 电

流变化, 因此为了分析方便起见, 可将器件视作理想器件, 即不考虑与 V_{FB} 相关的器件功函数差和氧化层中电荷对栅 V_G 的影响, 这样的处理获得了主要的物理机制而并不会影响分析结果. 于是 φ_s 可表示为 [15,16]

$$\varphi_s = V_G - V_{OX}, \quad (7)$$

沟道耗尽状态时, V_{OX} 跟耗尽区的电荷成正比关系, 而 V_B 对耗尽区的电荷影响极大, V_{OX} 与 V_B 的关系为

$$\begin{aligned} V_{OX} &= \frac{d_{ox}}{\epsilon_{ox}} \sqrt{2q\epsilon_s N_A (\varphi_s - V_B)} \\ &= \frac{d_{ox}}{\epsilon_{ox}} \sqrt{2q\epsilon_s p_0 (\varphi_s - V_B)}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中 V_{OX} 为氧化层上的电压, ϵ_s 和 ϵ_{ox} 分别为硅和二氧化硅的介电常数, N_A 为衬底掺杂浓度 ($N_A = p_0$), d_{ox} 为氧化层厚度.

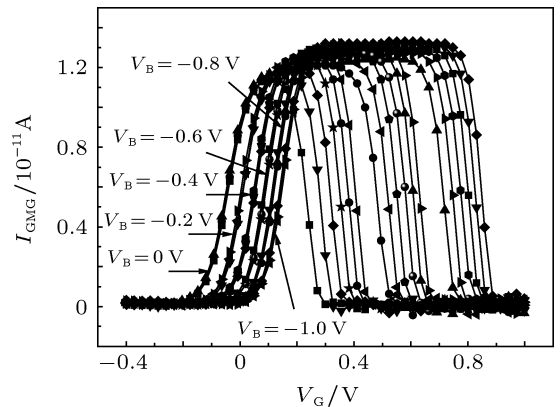


图2 不同 V_B 情形时三种 V_D 下的 I_{GMG} 曲线比较

从 (7) 和 (8) 两式中, 可看出衬底偏压 V_B 可调节表面电势 φ_s 和 V_{OX} 在栅电压 V_G 中的占有比重. 将 (8) 式代入 (7) 式, 解方程可求得 φ_s 为

$$\begin{aligned} \varphi_s &= \left\{ \left(\frac{\epsilon_s p_0 q d_{ox}^2}{2\epsilon_{ox}^2} + V_G - V_B \right)^{1/2} - \frac{(2\epsilon_s p_0 q)^{1/2} d_{ox}}{2\epsilon_{ox}} \right\}^2 \\ &\quad + V_B \\ &= \frac{3\epsilon_s p_0 q d_{ox}^2}{4\epsilon_{ox}^2} + V_G - \frac{(2\epsilon_s p_0 q)^{1/2}}{\epsilon_{ox}} \\ &\quad \times \left(\frac{\epsilon_s p_0 q d_{ox}^2}{2\epsilon_{ox}^2} + V_G - V_B \right)^{1/2}, \end{aligned} \quad (9)$$

(9) 式给出了反偏衬底偏压 V_B ($V_B < 0$ V) 对 φ_s 的调节作用. 根据 (9) 式, 图 3(a) 模拟了不同 V_B 下较小 V_G (上升沿耗尽状态时) 和表面电势 φ_s 的关系. 从图中看出随 $|V_B|$ 增大, φ_s - V_G 曲线向下移动, 即在

相同 V_G 时, φ_s 变小了. 这说明了增大 $|V_B|$ 导致了 V_{OX} 在 V_G 中占据的比重增加, 从而引起了相同 V_G 下的 φ_s 的减小. 根据 (5) 式, φ_s 的减小将引起 p_s 的增加, 势必会造成 g_r 的漂移. 将 (9) 式引入 (6) 式中, 图 3(b) 进一步模拟了 g_r 随 V_B 的变化, 从图可看出, 随着反偏 V_B 的增大, g_r 出现了向着正栅压方向漂移, 即使得相同 V_G 下的 g_r 减小. 显然, 根据 (1) 式, g_r 减小将导致 I_{GMG} 减小.

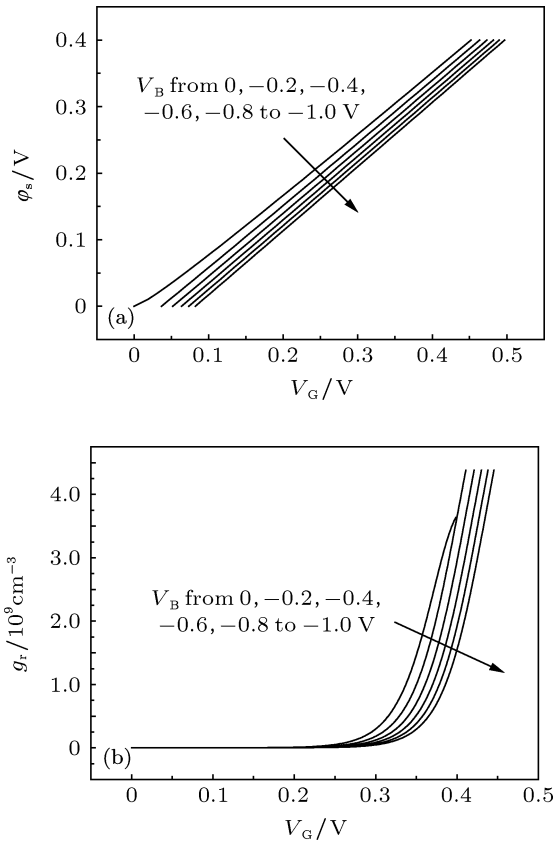


图3 衬底掺杂浓度 $N_A = 1.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $d_{ox} = 4 \text{ nm}$, 不考虑栅氧化层固定电荷的影响的器件模拟结果 (a) 不同 V_B 下的 V_G 与 φ_s 的关系; (b) 相应的不同 V_B 下的 g_r 和 V_G 的关系

图 3 中的模拟结果和图 1 中的实验结果相一致, 这说明引起 I_{GMG} 上升沿漂移的是由于反偏 V_B 所造成的相同 V_G 下表面势 φ_s 减小所致使的, 这个结果也更深一步地确认了 V_B 在上升沿起决定作用的物理机制的合理性.

图 1 中 I_{GMG} 曲线的下降沿在 V_B 的影响下发生了变化, 随着反向衬底偏压 V_B 的增加而向右漂移. 对于下降沿而言, 它处在沟道弱反型状态下, 此时 n_s 随着 V_G 的增大迅速增加, 并且要远远大于 p_s , 因此决定下降沿产生因子 g_f 的主要为 n_s . 而 V_D 也可通过 n_s 作用在沟道耗尽层上, 这时不能再忽略, 这点从图 2 中相同 V_B 下不同 V_D 情形时的 I_{GMG} 的

下降沿不重合的现象可体现出来.

因此考虑了 V_D 下的 n_s 可表示为

$$n_s(V_B) = n_0 \exp(q(\varphi_s + V_B - V_D)/kT). \quad (10)$$

类似于上升沿的推导, 此时的表面势 φ_s 为

$$\varphi_s = \frac{3\varepsilon_s p_0 q d_{ox}^2}{4\varepsilon_{ox}^2} + V_G - \frac{(2\varepsilon_s p_0 q)^{1/2}}{\varepsilon_{ox}} \times \left(\frac{\varepsilon_s p_0 q d_{ox}^2}{2\varepsilon_{ox}} + V_G - V_B + V_D \right)^{1/2}. \quad (11)$$

从 (11) 式继续推导, 可得到与 $n_s(V_B)$ 相关 $\varphi_s + V_B - V_D$:

$$\varphi_s + V_B - V_D = \frac{3\varepsilon_s p_0 q d_{ox}^2}{4\varepsilon_{ox}^2} + V_G - \frac{(2\varepsilon_s p_0 q)^{1/2}}{\varepsilon_{ox}} \times \left(\frac{\varepsilon_s p_0 q d_{ox}^2}{2\varepsilon_{ox}} + V_G - V_B + V_D \right)^{1/2} + V_B - V_D. \quad (12)$$

从 (12) 式可以看出, 随着 $|V_B|$ 的增大 ($V_B < 0 \text{ V}$), 相同 V_G 下的 $\varphi_s + V_B - V_D$ 减小, 继而 n_s 减小 (根据 (10) 式). 如上所述, n_s 此时起决定作用, 因此下降沿的 g , g_f 变大. 这反映在 I_{GMG} 曲线的下降沿向右漂移, 即相同 V_G 下 I_{GMG} 随着 $|V_B|$ 的增加而增大, 如图 1 中所示. 同时根据 (12) 式还可看出, 随着 V_D 的不同, V_B 所起的作用程度也发生着变化. 显然, 当 V_D 较大时, V_B 对 g_f 的调节作用将没有较小的 V_D 时强烈. 这也同实验结果一致, 图 1 中随着 V_D 的增大, 相同 V_B 的变化区间内 (从 0 到 -1.0 V), $V_D = 0.6 \text{ V}$ 时的曲线下下降沿变化的跨度较小, 而 $V_D = 0.2 \text{ V}$ 时的曲线下下降沿变化的跨度最大.

为了更好地分析 V_B 对 I_{GMG} 曲线上上升沿和下降沿的影响, 图 4 提取了图 1 中三种漏压下的 I_{GMG} 曲线跨导 G . G 能够反映出栅控制 I_{GMG} 的能力, 因此通过观察 G 在不同 V_B 下的变化, 可以发现 V_B 对 V_G 在 I_{GMG} 上升沿和下降沿中的控制作用的影响. G 可表示为

$$G = \frac{\partial I_{GMG}}{\partial V_G} \propto \frac{\partial g}{\partial V_G}. \quad (13)$$

图 4 中每个 V_D 下的 G 在整个 V_G 区域内出现了左右两个峰值: 左边的峰处在 I_{GMG} 上升沿的区域, 因此其表征了上升沿时曲线随栅压的变化速度, 它的峰值定义为 G_{MR} . 右边的峰则表征了下降沿时曲线随栅压的变化快慢, 其峰值为 G_{MF} . 图中显示随着 V_B 反偏程度的增大, G 曲线向右偏移, 曲线的峰值 G_{MR} 和 G_{MF} 逐渐变大. G 曲线向右漂移时由

于前面所述的 I_{GMG} 随 V_B 的反偏增加向右漂移而造成的, 而 G_{MR} 和 G_{MF} 变大表明随着 V_B 的反偏增大, 栅压 V_G 对上升沿和下降沿的控制能力增强.

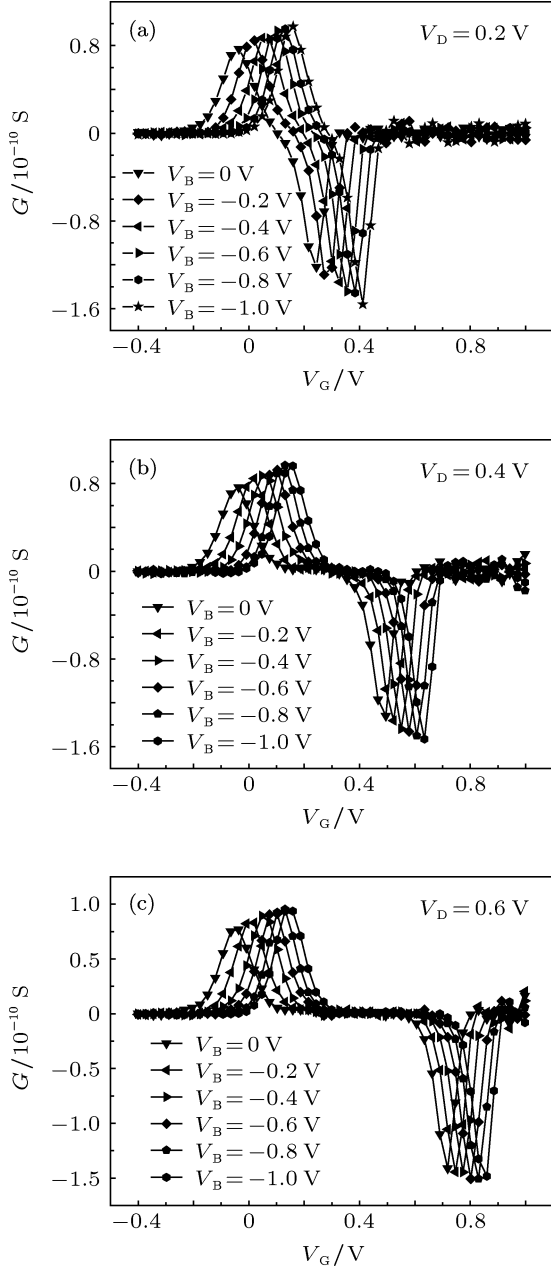


图4 不同 V_B 下的跨导 G 曲线 (a) $V_D = 0.2 \text{ V}$; (b) $V_D = 0.4 \text{ V}$; (c) $V_D = 0.6 \text{ V}$

图5为从图4中提取的 G_{MR} 和 G_{MF} 在对数坐标下随 V_B 的变化关系. 可以看出, 三种 V_D 下每种 V_B 对应的 G_{MR} 重合, 可根据 (9) 式得出原因: 这是由于表面势 ϕ_s 只与 V_B 有关, 而与 V_D 无关所致. 图中还显示出上升沿的 G_{MR} 随着 $|V_B|$ 呈增长关系. 根据上升沿时的表面势 ϕ_s 与 V_B 的关系 (9) 式, 推

导得:

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial V_B} = \frac{(2\varepsilon_s p_0 q)^{1/2}}{2\varepsilon_{\text{ox}}} \times \left(\frac{\varepsilon_s p_0 q d_{\text{ox}}^2}{2\varepsilon_{\text{ox}}} + V_G - V_B \right)^{-1/2}. \quad (14)$$

从上式看出, 给定 V_B 反偏下 ($V_B < 0 \text{ V}$), V_G 的变化能引起表面势 ϕ_s 的变化. V_B 反偏越小, 这种变化程度越大; V_B 反偏越大, 变化越小. 而表面势 ϕ_s 的变化会引起 p_s 的变化, p_s 根据 (6) 式则影响到了 g_r . 因此 V_B 反偏越小, g_r 变化得越小; V_B 反偏越大, g_r 变化得越大. 基于 (13) 式, G 表示的正是 g_r 的这种变化. 因此 G_{MR} 会随着 V_B 反偏的增大而增加, 即如图5中所示. 同时从图中还可看出 G_{MR} 与 V_B 的这种增长在对数坐标下呈现为线性关系, 其斜率 s 为 0.10.

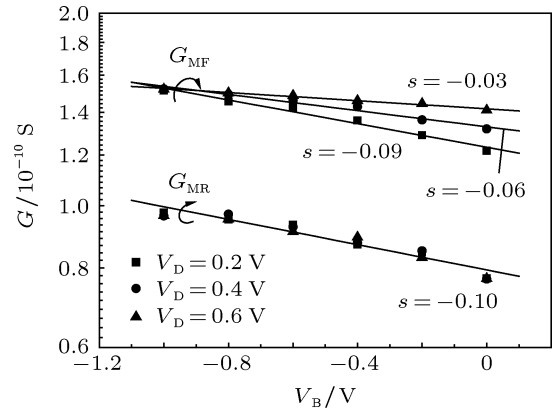


图5 三种 V_D 下 G_{MR} 和 G_{MF} 与 V_B 曲线比较

而对于图5中下降沿的 G_{MF} , 则可根据 (12) 式得出:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\phi_s + V_B - V_D)}{\partial V_B} \\ &= \frac{(2\varepsilon_s p_0 q)^{1/2}}{2\varepsilon_{\text{ox}}} \left(\frac{\varepsilon_s p_0 q d_{\text{ox}}^2}{2\varepsilon_{\text{ox}}} + V_G - V_B + V_D \right)^{-1/2} + 1. \end{aligned} \quad (15)$$

类似于上升沿的分析, 下降沿 g_f 主要由 n_s 来决定, 因此从 (15) 式可推导出: V_B 反偏越小, g_f 变化越小; V_B 反偏越大, g_f 变化越大; 继而下降沿的最大跨导 G_{MF} 会随着 $|V_B|$ 的增大而增加, 即如图5中所示. 然而与上升沿不同的是, 下降沿与 V_D 有关, 因此 G_{MF} 还会受到 V_D 的影响. 当 V_D 增大时, 注意到相比于较小的 V_D , 当 V_B 给定时, g_f 变化得越大, 因此 G_{MF} 的变化在大的 V_D 下更大. 图5中

从测试结果中提取的 G_{MF} 正是验证了上面的推理, 相同 V_B 下, $G_{MF}(V_D = 0.6 \text{ V}) > G_{MF}(V_D = 0.4 \text{ V}) > G_{MF}(V_D = 0.2 \text{ V})$. 此外, 从 (15) 式中还可得出, 在大的 V_D 情形下, G_{MF} 随 V_B 反偏而增大的趋势将减缓. 这也符合图 5 中随着 V_D 的增加 G_{MF} 拟合曲线斜率下降的现象, 即当 V_D 从 0.2, 0.4 变为 0.6 V, G_{MF} - V_B 曲线的斜率 s 则从 0.09, 0.06 减小到 0.03.

4 结论

本文研究了反向衬底偏压下 90 nm CMOS 工艺下纳米 LDD nMOS 器件栅调制界面产生电流 I_{GMG} 的特性. 随着 $|V_B|$ 的增大, 整个 I_{GMG} 曲线向右漂移. 对于上升沿而言, 沟道耗尽状态刚开始时 V_D 的作用可忽略, 其不影响 I_{GMG} 曲线, 因此三种不同 V_D 情形下当 V_B 相同时 I_{GMG} 曲线重合. 随着 V_B 反偏增大上升沿向右移动, 这不能归咎于平带电压 V_{FB} 的变化, 因为 V_B 并不会引发 V_{FB} 的变化. 这种现象是由于衬底偏压 V_B 调节了 V_{OX} 和表面电势 ϕ_s 在栅电压 V_G 中的占有比重所致. 随着 V_B 反偏电压的增大, 同一 V_G 下表面电势 ϕ_s 变小致使 p_s 变大从而导致 g_r 减小, 因此曲线表现为向右漂移. 而 I_{GMG} 下降沿的向右漂移则是由于: V_B 反偏电压

的增大, 相同 V_G 下表面电势 ϕ_s 变小致使 n_s 变小从而导致 g_f 变大. 文中进一步提取了上升沿和下降沿的跨导 G 来研究 V_B 对 I_{GMG} 的影响, 发现上升沿最大跨导 G_{MR} 在三种 V_D 下基本重合. V_B 反偏越小, g_r 随 V_G 变化得越小; V_B 反偏越大, g_r 变化得越大. 而 G 表示的正是 g_f 随 V_G 的这种变化, 因此上升沿最大跨导 G_{MR} 随着 V_B 反偏的增大而出现了增加的现象. 与之类似, 对于下降沿, 其最大跨导 G_{MF} 会随着 V_B 反偏的增大而增加. 然而与上升沿不同的是, 下降沿与漏电压 V_D 有关, 因此 G_{MF} 会受到 V_D 的影响. 当 V_B 给定时, g_f 随着 V_D 增大变得越大, 因此 G_{MF} 在大的 V_D 下也就变得更大. 图 5 中从测试结果中提取的 G_{MF} 正是验证了这一推理, 相同 V_B 下, $G_{MF}(V_D = 0.6 \text{ V}) > G_{MF}(V_D = 0.4 \text{ V}) > G_{MF}(V_D = 0.2 \text{ V})$. 同时, 在 V_D 增大的情形下, G_{MF} 随 $|V_B|$ 增大而增大的趋势却会减缓. 这也符合实验中提取的 G_{MF} 随着 V_D 的增加曲线斜率 s 却下降的现象, 即 s 从 $V_D = 0.2 \text{ V}$ 时的 0.09 减小至 $V_D = 0.6 \text{ V}$ 时的 0.03.

本文的结论可为纳米 CMOS 器件栅控界面产生电流衬底偏压效应及相关可靠性的研究提供有益的参考.

- [1] Chang I Y, You S W, Juan P C, Wang M T, Lee J Y 2009 *IEEE Electron Dev. Lett.* **30** 161
- [2] Cheng C Y, Fang Y K, Hsieh J C, Hsia H, Sheu Y M, Lu W T, Chen W M, Lin S S 2007 *IEEE Electron Dev. Lett.* **28** 408
- [3] Zhang E X, Fleetwood D M, Duan G X, Zhang C X, Francis S A, Duan R D, Zhang C X, Francis S A, Schrimpf R D 2012 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59** 3062
- [4] Pan J 2009 *IEEE Trans. Electron Dev.* **56** 1351
- [5] Young C D, Neugroschel A, Matthews K, Smith C, Heh D, Park H 2010 *IEEE Electron Dev. Lett.* **31** 653
- [6] Mori Y, Yoshimoto H, Takeda K, Yamada R 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 104513
- [7] Cui J W, Yu X F, Ren D Y, Lu J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 026102 (in Chinese) [崔江维, 余学峰, 任迪远, 卢健 2012 物理学报 **61** 026102]
- [8] Lawrence R K, Ioannou D E, Jenkins W C, Liu S T 2001 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **48** 388
- [9] Felix J A, Shaneyfelt M R, Dodd P E, Draper B L 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2378
- [10] Rao P R, Wang X Y, Theuwissen A J P 2008 *Solid-State Electronics* **52** 1407
- [11] Goiffon V, Cervantes P, Virmontois C, Corbiere F, Magnan P, Estribeau M 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 3076
- [12] Shi M S, Wu G Y 2008 *Physics of Semiconductor Devices* (Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press) p33
- [13] Chen H F, Guo L X, Du H M 2012 *Chin. Phys. B* **21** 088501
- [14] Wang B, Zhang H M, Hu H Y, Zhang Y M, Shu B, Zhou C Y, Li Y C, Lü Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 057103 (in Chinese) [王斌, 张鹤鸣, 胡辉勇, 张玉明, 舒斌, 周春宇, 李好晨, 吕懿 2013 物理学报 **62** 057103]
- [15] Pierret R F (Translated by Huang R) 2004 *Semiconductor Device Fundamentals* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p419 (in Chinese) [皮埃罗著, 黄如译 2004 半导体器件基础 (北京: 电子工业出版社) 第 419 页]
- [16] Liu E K, Zhu B S, Luo J S 1997 *Semiconductor Physics* (Beijing: National Defence Industry Press) p206 (in Chinese) [刘恩科, 朱秉升, 罗晋升 1997 半导体物理学 (北京: 国防工业出版社) 第 206 页]

Characteristics of gate-modulated generation current under the reverse substrate bias in nano-nMOSFET*

Chen Hai-Feng[†]

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

(Received 25 April 2013; revised manuscript received 8 May 2013)

Abstract

The characteristics of gate-modulated generation (GMG) current I_{GMG} in nano-scale LDD nMOSFET under the reverse substrate bias V_{B} are investigated. It is found that the rising and falling edges of I_{GMG} curve shift rightwards as $|V_{\text{B}}|$ increases. On the basis of experimental and theoretical analysis, the physical mechanism behind this shift phenomenon is attained. The shift phenomenon is ascribed from the fact that V_{B} modulates the proportion of surface potential ϕ_{s} in the gate bias V_{G} . ϕ_{s} decreases with $|V_{\text{B}}|$ increasing under a certain V_{G} , and consequently the maximum generation factor of the rising edge (g_{r}) diminishes and that of the falling edge (g_{f}) augments. Further, it is found that the transconductance peaks of the rising edge (G_{MR}) and falling edge (G_{MF}) increase with $|V_{\text{B}}|$ increasing. Moreover, G_{MR} and G_{MF} both have the linear relationship with V_{B} in log coordinate. Due to the different roles of drain bias V_{D} on the rising and falling edge of I_{GMG} curve, G_{MR} keeps constant but G_{MF} varies under different values of V_{D} . Increasing V_{D} can enhance the change of g_{f} with V_{G} , there by increasing G_{MF} under a given V_{B} . Also, this results in the fact that the trend of G_{MF} increasing with $|V_{\text{B}}|$ increasing slows down under a larger V_{D} : the slope of $G_{\text{MF}}-V_{\text{B}}$ curve decreases from 0.09 to 0.03 as V_{D} increases from 0.2 to 0.6 V.

Keywords: generation current, surface potential, substrate bias, nMOSFET

PACS: 85.30.De, 85.30.Tv

DOI: 10.7498/aps.62.188503

* Project supported by the Research Project of Education Department of Shaanxi Provincial Government, China (Grant No. 2013JK1095).

[†] Corresponding author. E-mail: chenhaifeng@xupt.edu.cn