

深亚微米电路 NMOS 器件 HCI 退化建模与仿真

李 康, 马晓华, 郝 跃, 陈海峰, 王俊平

(西安电子科技大学 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 提出一种深亚微米 NMOSFET 的热载流子注入下漏电流退化模型及其电路退化仿真方法。该模型将亚阈区、线性区和饱和区的漏电流退化行为统一到一个连续表达式中, 避免了分别描述时由于模型不连续而导致的仿真不收敛问题。并且在模型中对亚阈区的栅偏依赖现象进行建模, 提高了模型描述器件退化的准确度。用基于 $0.25\mu\text{m}$ 工艺的 NMOS 器件对模型进行了验证, 测试数据与仿真结果吻合得很好。

关键词: 深亚微米 NMOSFET; 热载流子注入退化; ΔI_d 模型; 电路可靠性

中图分类号: TN386.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-2400(2006)05-0721-04

Modeling and simulation of the HCI degradation model for the NMOSFET in deep submicron circuits

LI Kang, MA Xiao-hua, HAO Yue, CHEN Hai-feng, WANG Jun-ping

(Ministry of Edu. of Wide Band-gap Semiconductor Materials and Devices,
Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: A model of drain current degradation of DSM NMOSFET devices induced by HCI and implementation in circuit reliability simulation is proposed. The model unifies the subthreshold, linear and saturation regions into a continuous equation, which avoids the simulation convergence problem due to the discontinuous model. And the gate bias dependency in the subthreshold region is also modeled for improved accuracy. The model has a high accuracy for SMIC on their $0.25\mu\text{m}$ technologies. The simulation method in this paper has been applied to the XDRT circuit reliability simulator.

Key Words: deep submicron NMOSFET; HCI degradation; ΔI_d model; HCI circuit reliability simulation

当 MOS 器件尺寸进入到深亚微米后, 热载流子注入(HCI)引起的 MOSFET 退化成为一个关键问题。漏电流减小、小信号性能退化以及阈值电压漂移是 MOSFET 退化的典型形式。在半导体工业中, 广泛利用热载流子(HC)可靠性仿真工具来进行 MOSFET 电路可靠性的预测, 它的准确性很大程度上依赖对器件退化特性的精确建模。目前已经有两种方法来对器件的特性退化进行建模。一种方法是采用 Age 模型文件的方法, 这种方法由于参数提取过程过于复杂使操作不便, 并且会引入误差^[1]。另一种就是直接对漏电流退化进行建模的方法, 被称为 ΔI_d 模型, 能够适应对双向应力和不对称漏电流行为的建模。但目前由于模型精度低和模型不连续而影响其推广使用。因此, 对于 ΔI_d 方法, 提高仿真精度和模型的连续性是目前模型开发上面临的主要问题^[2~6]。

笔者提出一个 ΔI_d 模型, 将器件在亚阈区、线性区和饱和区的 HCI 退化行为统一到一个连续可导的模型中, 同时对影响模型准确性的漏电流退化栅偏依赖特性进行了建模。将这一模型应用到电路 HCI 退化评估方法中, 对电路的退化工作特性进行预测和评价。

1 全域连续漏电流退化 ΔI_d 模型

现有的 ΔI_d 模型对线性区的 I_{ds} 退化描述^[7]为

收稿日期: 2005-11-21

基金项目: 国家高技术研究发展项目(2003AA1Z1630); 国家自然科学基金资助项目(60376024, 60206006)

作者简介: 李 康(1973-), 男, 西安电子科技大学博士研究生。

$$\Delta I_D = I_{d0} \cdot K \cdot \bar{N}_{it} \cdot \frac{L_{it}}{L_{eff}} \cdot \left[\frac{1}{1 + V_{ds}/(E_{sat} \cdot L_{eff})} \right] , \quad (1)$$

其中 I_{d0} 为初始线性漏电流, \bar{N}_{it} 为沿沟道的平均有效界面态密度, L_{it} 为沿沟道的 HCI 损伤扩展区域, L_{eff} 为有效沟道长度, E_{sat} 为速度饱和电场. K 与垂直于沟道方向的纵向有效电场 L_{eff} 有关, 并定义^[8]为

$$K = 3.2 \times 10^{-12} / (1 + (2.66 \cdot E_{eff})^{K_1}) . \quad (2)$$

式(2)中, $E_{eff} = (V_{gs} + V_{th}) / (6 \cdot t_{ax})$. 上述模型存在不完善之处, 主要表现在两个方面. 首先, 式(1)是在线性工作区得到, 并被推广到饱和工作区. 根据不同 V_{ds} 工作范围, 模型被分成 3 段, 采用分段函数描述^[7]. 分段函数的不连续可导会造成电路仿真时数值计算收敛困难, 这一问题限制 ΔI_d 模型的使用. 其次, 式(1)没有考虑到亚阈区情况. 实验表明, 在 V_{gs} 靠近阈值电压附近 $\Delta I_d/I_d$ 对栅电压有强依赖关系, 即栅压依赖使在低栅压处漏电流变化的比值存在一个峰值. 这一现象是由 HCI 引起的沟道迁移率退化引起的, 沟道迁移率的退化会在阈值电压附近产生峰值^[6]. 但这一延伸到亚阈区的栅压依赖现象并没有在现有模型中得到反映, 影响了模型的准确性, 限制了这一模型的使用. 笔者着重解决以上两方面问题.

1.1 平滑函数定义

首先, 对于上述模型不连续的问题, 可以采用“平滑函数”方法来解决. 新的模型公式为

$$\Delta I_d/I_d = (\Delta I_d/I_d)_{lin} \cdot G(V_{gseff}, V_{dsmiddle}, V_{dshigh}, P) , \quad (3)$$

式中 $(\Delta I_d/I_d)_{lin}$ 表示在线性区漏电流相对退化量; 函数 G 是一拟合函数, 式中采用函数 G 与 $(\Delta I_d/I_d)_{lin}$ 的乘积来表达在整个工作区域内漏电流相对退化量. 并且 G 是以下几个平滑函数为自变量的函数: V_{gseff} 定义为有效栅电压, 是与栅压 V_{gs} 相关的函数; $V_{dsmiddle}$ 定义为有效源漏电压, V_{dshigh} 为有效饱和电压, 是与漏源电压 V_{ds} 相关的函数; P 为其他拟合参数. 3 个平滑函数 V_{gseff} , $V_{dsmiddle}$ 和 V_{dshigh} 使亚阈区、线性区和饱和区的漏电流退化模型可以用单一公式进行描述, 并且公式连续可导.

V_{gseff} 使模型在亚阈区和线性区转换时保持连续可导, 表达式为

$$V_{gseff} = \left\{ V_t \cdot \ln \left[1 + \exp \left(\frac{V_{gs} - V_{th}}{V_t} \right) \right] \right\} / \left[1 + \exp \left(- \frac{V_{gs} - V_{th} - V_{off}}{V_t} \right) \right] , \quad (4)$$

式(4)中 V_t 为热电压, V_{th} 为阈值电压, V_{off} 参数定义为阈值电压偏移, 用来调整当 $V_{gs} = 0$ 时的泄漏电流.

有效源漏电压 $V_{dsmiddle}$ 表达式为

$$\begin{cases} V_{dsmiddle} = [\tanh(V_c) \cdot V_a + \tanh(-V_c) \cdot V_b] / 2 , \\ V_a = V_{dsat} - (V_{dsat} - V_{ds} - \Delta + ((V_{dsat} - V_{ds} - \Delta)^2 + 4 \cdot \Delta \cdot V_{dsat})^{1/2}) / 2 , \\ V_b = (V_{ds} - V_{low} - \Delta + ((V_{ds} - V_{low} - \Delta)^2 + 4 \cdot \Delta \cdot V_{low})^{1/2}) / 2 + V_{low} , \\ V_c = V_{ds} - (V_{dsat} + V_{low}) / 2 . \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中 V_{dsat} 为饱和漏源电压; V_{low} 定义为 $A \cdot V_{dsat}$, A 为小于 1 的拟合参数, 对于给定的工艺为一常值; Δ 定义为有效漏源电压平滑系数, 在 $[0, 0.01]$ 之间取值.

有效饱和电压 V_{dshigh} 为

$$V_{dshigh} = (V_{ds} - V_{dsat} - \Delta + ((V_{ds} - V_{dsat} - \Delta)^2 + 4 \cdot \Delta \cdot V_{dsat})^{1/2}) / 2 + V_{dsat} . \quad (6)$$

式(4)~(6)所表达的平滑函数可以用图 1 进行说明. 图 1(a)给出 $V_{dsmiddle}$ 和 V_{dshigh} 随 V_{ds} 的变化规律. 可以看到, 随着 V_{ds} 在工作区域内变化, $V_{dsmiddle}$ 的变化区间被映射到 $[V_{low}, V_{dsat}]$ 之间, 而 V_{dshigh} 则被映射到大于等于饱和漏电压 V_{dsat} 的区间上. 因此通过平滑变换, 这两个电压在 V_{ds} 的变化范围内能够满足模型需要. V_{dshigh} 用于修正速度饱和区沟道长度 ΔL 的计算公式, 使其在线性区向饱和区过渡时连续可导. 修正后 ΔL 为 $\Delta L(V_{dshigh})$, 且在线性区时 $\Delta L = 0$. 图 1(b)绘制了有效栅电压随 $V_{gs} - V_{th}$ 变化的半对数关系. 当 $V_{gs} < V_{th}$ 时, 有效栅电压 V_{gseff} 以指速率快速趋近于 0, 且随 V_{off} 值不同而有不同的指速率, V_{off} 取不同的值可以对 $V_{gs} = 0$ 时的漏源泄漏电流进行调整. 当 $V_{gs} \geq V_{th}$ 时, $V_{gseff} = V_{gs} - V_{th}$, 即实际在栅源端起作用的电压.

1.2 对栅压偏置依赖现象的建模

为了能够更好地反映模型在阈值电压附近的栅压偏置依赖关系, 对 K 值拟合采用新的经验公式 K' :

$$K' = \frac{A_1 + A_2 \cdot (1 - \exp(-A_3 V_{gs}))}{1 + A_4 \cdot (V_{gs} - A_5 \cdot V_{th})^{A_6}} , \quad (7)$$

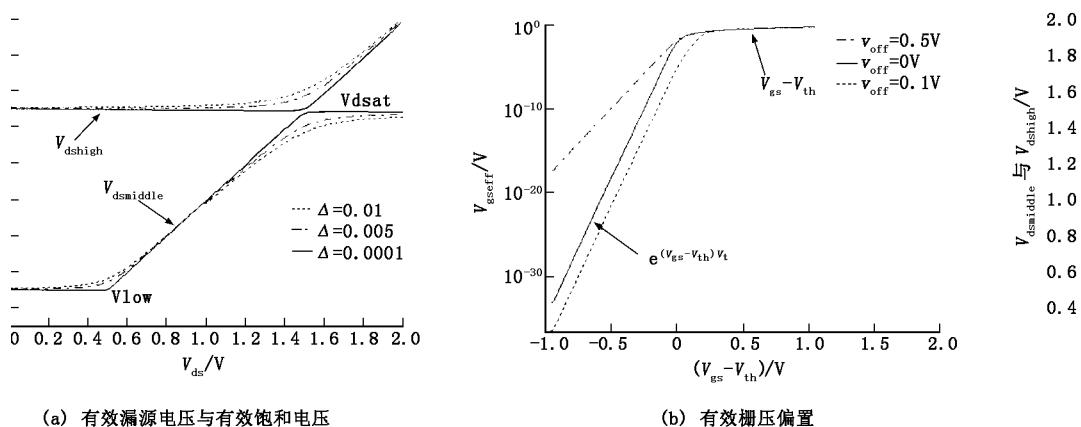


图 1 平滑函数曲线

其中 $A_1 \sim A_6$ 为拟合参数. 式中分子的指数项用来描述在阈值电压附近 $\Delta I_d/I_d$ 的增加部分, 并且这一指数项还反映了在亚阈区沟道电荷的指数增加性质.

利用式(4)~(6)定义的平滑函数对分段表达的 ΔI_d 模型进行修改, 并且通过式(7)来拟合亚阈区的栅压依赖效应. 在饱和区的 L_{eff} 和 L_{it} 应为 $L_{\text{eff}} - \Delta L(V_{\text{dshigh}})$, 即不包含沟道速度饱和区域的长度 ΔL . ΔL 采用 V_{dshigh} 作自变量后, 在整个工作区连续可导, 且在线性区 $\Delta L = 0$. 将函数 G 定义为 $1 - (B_1 \cdot (V_{\text{dsmiddle}} - V_{\text{low}})) / (V_{\text{gseff}}^{B_2})$, 用来拟合在器件从线性区向饱和区过渡时由于带电界面态密度的下降而导致的漏电流退化量的减小, 其中的 B_1 和 B_2 为模型拟合参数. 用平滑函数作为自变量的函数, G 也满足全域连续的条件. 由此可以得到新的正向应力下的 ΔI_d 模型为

$$(\Delta I_d)_f = I_{d0} \cdot K' \cdot \bar{N}_{\text{it}} \cdot \frac{L_{\text{it}} - \Delta L(V_{\text{dshigh}})}{L_{\text{eff}} - \Delta L(V_{\text{dshigh}})} \cdot \left[\frac{1}{1 + V_{\text{dsmiddle}} / (E_{\text{sat}} \cdot (L_{\text{eff}} - \Delta L(V_{\text{dshigh}})))} \right] \cdot \left[1 - \frac{B_1 \cdot (V_{\text{dsmiddle}} - V_{\text{low}})}{V_{\text{gseff}}^{B_2}} \right], \quad (8)$$

式中 L_{it} 是沟道损伤区长度, 可以表示成 $L_{\text{it}} = (C_1(V_{\text{gs}} + C_2) \cdot V_{\text{ds}} + C_3) \cdot \zeta^n$, C_1, C_2, C_3 为拟合参数; I_{d0} 代表初始线性区漏电流; 同样, \bar{N}_{it} 可以看成是 ζ 参数的函数^[9,10]:

$$\bar{N}_{\text{it}} = f(\zeta(t)) = f\left(\int_0^t \frac{I_d}{WH} \left(\frac{I_{\text{sub}}}{I_d}\right)^m dt\right), \quad (9)$$

其中 H, m 是与工艺相关的热载流子退化常数, W 为沟道宽度, I_{sub} 为衬底电流. 采用同样的方法可以得到反向应力下 NMOSFET 的漏电流退化 $(\Delta I_d)_r$ 模型, 最终可以得到双向漏电流退化模型

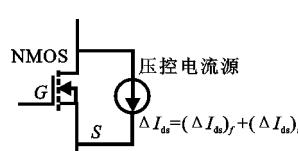
$$\Delta I_d = (\Delta I_d)_f + (\Delta I_d)_r. \quad (10)$$

式(10)考虑到正向和反向应力条件下的退化情况, 可以用来对双向应力条件下如传输门电路的退化进行分析, 它在器件工作的 3 个区域上是连续的.

2 电路 HCI 可靠性评价方法

上述模型被用在 XDRT 可靠性仿真系统中对电路的 HCI 退化进行分析. 在可靠性电路仿真过程中, ΔI_d 模型在电路仿真时可以利用压控电流源器件来实现. 将 HCI 导致的漏电流变化量用电流源的形式添加到 MOSFET 器件的源漏端, 如图 2 所示. 电流源的值由漏电流退化模型 $\Delta I_d = (\Delta I_d)_f + (\Delta I_d)_r$ 来决定, $(\Delta I_d)_f$ 代表正向应力下的漏电流退化, $(\Delta I_d)_r$ 代表源漏端交换后反向应力下漏电流退化.

XDRT 可靠性仿真系统采用图 3 的流程对电路 HCI 退化进行评估.“新电路仿真”代表应力施加阶段;“退化电路仿真”则代表电路的退化评估阶段. 在评估阶段需要根据

图 2 ΔI_d 的受控电流源模型

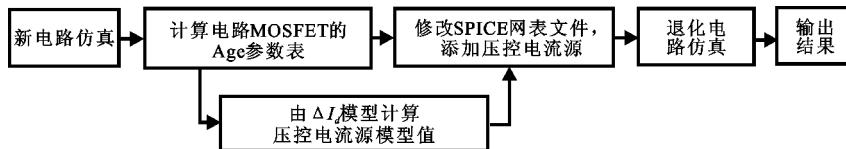


图 3 XDRT 中对 HCI 可靠性电路退化的仿真流程

在应力阶段得到的 MOSFET 退化特性来仿真电路的退化行为。当 $V_{ds} > 0$ 时, MOSFET 积累正向的 ζ 值以及在漏端产生的沟道损伤扩展 L_{it} ; 当 $V_{ds} < 0$ 时, MOSFET 积累反向的 ζ 和在源端产生的沟道损伤扩展 L_{it} , 且这些在应力期间的 ζ 和 L_{it} 值被 XDRT 保存, 形成 ζ 参数表。应力阶段结束后, 用这些信息计算电路中 MOSFET 的漏电流退化行为。XDRT 不对 SPICE 模型做任何修改, 而是采用修改评估阶段电路仿真输入的方法, 将器件漏电流退化行为以压控电流源的形式添加到电路中。这种方法优点在于可靠性仿真工具适用于任何基于 SPICE 模型的电路仿真器。

3 结果与讨论

采用 TSMC 提供的 5/0.25 μm 的 NMOSFET 器件进行测试, 并将测量值和仿真值进行了对比。

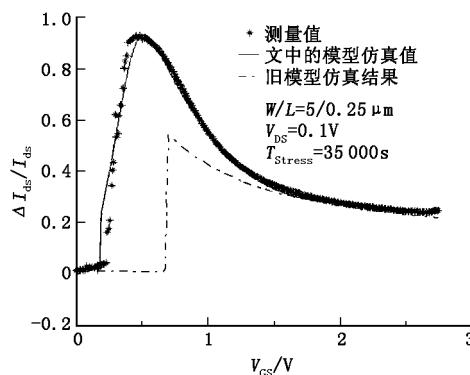
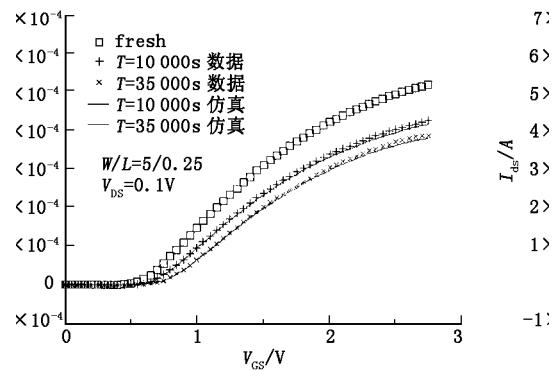
图 4 $\Delta I_d/I_d$ 比值随 V_{gs} 变化的测量值与新旧模型仿真值比较

图 5 转移特性的退化仿真与测量值比较

通过图 4 中对 NMOSFET 漏电流退化栅偏依赖关系曲线的绘制可看出, 笔者提出的模型在 3 个区域的仿真得到一条连续的退化曲线, 并且栅偏依赖现象的仿真值与测量值拟合得很好。而式(1)提出的模型对 $V_{gs} > V_{th}$ 部分曲线吻合较好, 但在低栅压时出现了较大的偏差。图 5 为线性区转移特性退化情况, 图中对退化 10 000 s 和 35 000 s 后的转移特性的仿真结果与测试数据进行了比较, 吻合得很好。图 6 是对输出特性退化仿真结果与测量结果进行的比较, 两组仿真结果与测试结果也吻合很好。

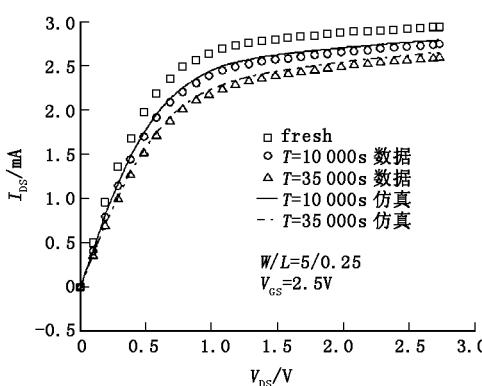
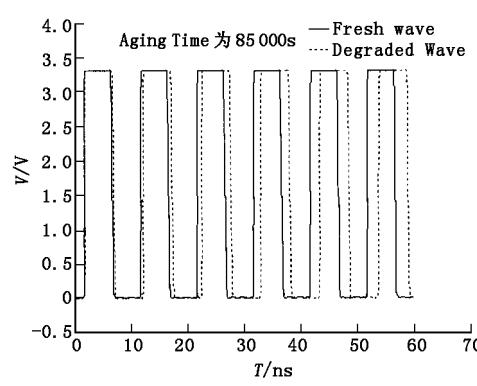


图 6 输出特性的退化测量值与仿真比较

图 7 17 级环形振荡器退化仿真, $T_{age} = 35 000 \text{ s}$