

# 深亚微米 HCI 模型参数多目标全域提取方法\*

李 康 郝 跃 刘红侠 马晓华 马佩军

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

**摘要:** 研究了一种建立在退化栅电流物理解析模型基础上的深亚微米 pMOS 器件 HCI(hot carrier injection)退化模型. 提出了一种基于 L-M(Levenberg-Marquardt)算法的多目标响应全域优化提取策略,并对可靠性模型参数进行优化提取. 分析了优化过程中由于参数灵敏度过低产生的问题并提出采用递归算法求解不同时刻栅电流注入电荷量的加速计算方法. 最后,给出了最优参数提取的结果,并且将测量值与理论值进行了比较,得到很好的一致性.

**关键词:** HCI; 时变栅电流模型; 参数提取

**EEACC:** 0260; 2560B

**PACC:** 7220J

**中图分类号:** TN386.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2005)10-2038-06

## 1 引言

集成电路(IC)设计和仿真的精度取决于所采用的器件模型的精度和模型参数的精度. 随着 IC 设计向着 ULSI 规模延伸,器件的尺寸也已经进入了深亚微米和超深亚微米的规模. 由于器件沟道的缩短,强电场引起的可靠性对电路性能的影响日益严重,因此对在设计阶段考虑器件的可靠性问题提出了要求. 电路可靠性仿真的精度同样也是由器件可靠性模型和可靠性模型参数来共同决定. 在参数提取方面,最优提取方法已经越来越多地被人们所使用. 这不仅是因为此方法提取简单易行,精度较高,并且在参数提取中能够反映出所有被提取参数对器件可靠性模型的影响,以及各参数之间的相互关系.

本文的重点是对 pMOSFET 参数进行最优提取(实际上对 nMOSFET 采用的方法也可以是同样的). 电路进入超深亚微米阶段, pMOSFET 的热载流子(hot carriers)可靠性变得越来越不稳定,并且已经引起了越来越多的重视<sup>[1~4]</sup>. 尽管在相同的偏置条件下, pMOSFET 与 nMOSFET 相比热载流子要少得多,但是它们仍然表现出多种不同于

nMOSFET 器件的不稳定性现象,这使得小尺寸的 pMOS 器件退化得很快<sup>[5]</sup>. pMOS 器件中由“雪崩”产生的热载流子注入(HCI)到栅氧层,形成氧化层电子陷阱. 这些带有负电荷的氧化层陷阱产生的电场改变了器件的平带电压和电子迁移率,并随着陷阱密度的不断积累,产生了线性/饱和漏电流以及跨导和阈值电压的漂移,从而使器件特性退化<sup>[5,6]</sup>.

本文采用多目标响应的优化策略,利用 L-M 方法来对 pMOSFET 的 HCI 退化模型参数进行总体提取,一次性得到时变栅电流模型和器件退化模型的参数. 该研究对器件可靠性设计和电路优化都是很有意义的.

## 2 器件 HCI 可靠性退化模型

Huang 和 Doyle 等人研究发现,在低栅压偏置条件下, pMOSFET 跨导特性退化峰值和电子栅电流峰值同时出现,这说明栅氧化层陷阱电荷是 pMOSFET 退化的主导因素<sup>[5,7]</sup>. 因为氧化层陷阱电荷作为总注入电荷的一部分,它们之间存在着一定的线性关系<sup>[6]</sup>,Doyle 提出一种以栅电流和注入电荷乘积作为监控量来描述器件跨导变化的方法,

\*国家高技术研究发展计划(批准号:2003AA1Z1630),国家自然科学基金(批准号:60206006)资助项目

李 康 男,1973 年出生,博士研究生,主要从事深亚微米器件可靠性研究.

郝 跃 男,1958 年出生,教授,博士生导师,主要从事深亚微米器件、电路建模和表征技术的研究.

2005-01-17 收到,2005-06-01 定稿

取得了较好的对数线性关系<sup>[5]</sup>. 这一关系可采用如下模型描述：

$$g_m / g_m = A (I_g Q_{inj} / W)^n = A \left[ \frac{1}{W} I_g I_g dt \right]^n \quad (1)$$

式中 注入电荷量  $Q_{inj}$  可以采用对栅电流积分的方法获得. 因为 pMOSFET 进入深亚微米后, 由 HCI 应力引起的器件损伤将引起全局性特性退化, 即氧化层电荷陷入导致跨导退化, 同时引起  $V_{th}$  和  $I_{dsat}$  等参数的退化<sup>[6]</sup>, 因此(1)式中采用符号  $D$  来统一表达上述参数的退化. 由此可见, 栅电流模型的精确程度会直接影响到器件退化的预测精度. 而 pMOSFET 在 HCI 条件下, 栅电流不是常值, 而是随时间衰减的, 目前对这种退化栅电流采用经验拟合模型  $I_g = A t^n$  进行描述. 拟合参数  $A$  与栅长和偏置电压相关, 参数  $n = -0.3 \sim -0.4$ <sup>[6,7]</sup>. 这一经验模型不能完全反映出沟道电场变化和氧化层陷阱电荷积累对  $I_g$  的影响, 其外推结果的准确性不能保证, 从而限制了这一退化模型的使用. 因此, 精确的栅电流解析物理模型的建立对退化预测是十分必要的.

pMOSFET 在低栅压条件下, 热电子由碰撞电离产生的衬底电流得到, 由“幸运电子模型”概念, pMOSFET 中电子发射的物理过程应是: 在漏区由碰撞电离产生的电子被纵向场加速获得高于界面势垒的能量, 实现向栅电极的发射. 图 1 为描述这一过程的能带示意图, 其中 A 过程为碰撞电离后获得垂直动量的电子; B 过程为负纵向电场加速电子得到

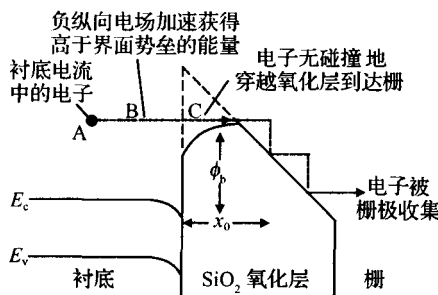


图 1 电子栅电流形成的能带图

Fig. 1 Energy band plot for depicting electron gate current

大于界面势垒能量  $\phi_b(y)$  的过程, 其概率为  $e^{-\phi_b(y)/|E_x(y)|}$ , 为电子平均自由程; C 过程为热电子克服镜像势后穿越氧化层到达栅极, 概率为  $e^{-x_0/\lambda_{ox}}$ ,  $x_0$  为镜像势峰值与界面之间的距离,  $\lambda_{ox}$  为氧化层电子平均自由程. 界面势垒  $\phi_b(y)$  由(2)式来确定:

$$\phi_b(y) = \begin{cases} \phi_{b0} - b E_{ox}^{1/2}(y) - b E_{ox}^{2/3}(y), & E_{ox}(y) \geq 0 \\ \phi_{b0}, & E_{ox}(y) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $E_{ox}(y)$  为氧化层电场分布;  $\phi_{b0}$  为 Si-SiO<sub>2</sub> 界面势垒;  $b, b$  为系数. 由热电子形成的栅电流可由(3)式描述:

$$I_g = \iint dx dy \cdot J_{bs}(x, y) e^{-\phi_b(y)/|E_x(y)|} e^{-x_0/\lambda_{ox}} \quad (3)$$

衬底电流密度是关于  $(x, y)$  的二维分布函数,  $x$  为沟道内到 SiO<sub>2</sub>-Si 界面的距离,  $y$  为沟道内点到源结距离. 假设其沿沟道横向为均匀分布, 并取沿  $x$  方向上的最大衬底电流密度作为该方向上的衬底电流密度值, 经过这样的简化可以得到经验衬底电流密度表达式<sup>[8]</sup>:

$$J_{bs}(x, y) \Big|_{x=x_{max}} = I_{ds} A_n e^{-B_n/E_y(y)} \quad (4)$$

这样得到的栅电流模型只是  $y$  的函数, 由此可确定栅电子电流密度:

$$J_{G0}(y) = I_{ds0} A_n e^{-B_n/E_{y0}(y)} e^{-x_0(y)/\lambda_{ox}} e^{-\phi_{b0}(y)/|E_x(y)|} \quad (5)$$

但在热电子注入条件下(低栅压条件), pMOSFET 的栅电流也会随应力时间而产生变化. 这种变化是由于栅氧化层陷阱电荷密度变化引起平带电压漂移造成的<sup>[9]</sup>. 平带电压漂移可以表达为:  $V_{FB}(y, t) = qN_{ox}(y, t)/C_{ox}$ . 考虑到平带电压漂移的栅电子电流密度表达为:

$$J_G(y, t) = J_{G0}(y) e^{-V_{FB}(y, t)/E_x(y)} \quad (6)$$

$N_{ox}(y, t)$  为陷阱电荷密度随沟道位置  $y$  ( $y=0$  为源结) 和应力时间的分布, 由氧化层电荷陷入速率方程决定:

$$\frac{dN_{ox}(y, t)}{dt} = N_0 \frac{J_{G0}(y)}{q} e^{-N_{ox}(y, t)/N_x(y)} \quad (7)$$

其中  $N_0$  为器件初始态的陷阱态密度;  $q$  为捕获截面积;  $\frac{1}{N_x(y)} = \frac{q}{2 E_x(y) C_{ox}} + \frac{1}{N}$ ,  $N$  为在库仑力排斥下陷阱态密度. 由此解得  $N_{ox}(y, t)$ , 带入(6)式可得栅电流密度公式:

$$J_G(y, t) = J_{G0}(y) \left[ \frac{N_0}{N_x(y)} \frac{J_{G0}(y)}{q} t + 1 \right] \frac{1}{1 + \frac{2 E_x(y) C_{ox}}{qN}} \quad (8)$$

由于碰撞电离发生在靠近漏区的饱和沟道区域内, 退化栅电流模型即可由下面的积分得到:

$$I_g(t) = \int_{L-L}^L J_G(y, t) dy \quad (9)$$

式中  $L$  为有效沟道长度;  $L-L$  为饱和沟道区的长

度. 这一退化栅电流模型依赖于时间, 也称为时变栅电流模型 (time-dependence gate current model). 这一模型从器件损伤物理机制进行建模, 能够更好地反映栅电流退化情况. 在此基础上, 采用多目标优化方法对退化模型进行参数全域提取, 优化结果能最佳地反映出退化过程各参数之间的相互影响, 与物理解析模型结合, 即可对 pMOSFET 的退化过程作出准确的预测.

### 3 多目标优化的参数全域提取算法

pMOSFET 的 HCI 退化模型包括时变栅电流模型 [ (9) 式 ] 和退化模型 [ (1) 式 ]. 设  $I_{CSi}(\bar{z})$  是电流模型参数  $\bar{z}_I = (z_1, z_2, \dots, z_n)_I$  的第  $i$  个理论计算值,  $\text{delta}D_i(\bar{z})$  是退化模型参数  $\bar{z}_D = (z_1, z_2, \dots, z_n)_D$  的第  $i$  个理论计算值;  $I_{mi}$  是第  $i$  个实际测量的响应值的抽样点,  $\text{delta}D_{mi}$  是器件退化量的第  $i$  个测量抽样. 分别得到栅电流模型和退化函数的误差函数:

$$\begin{cases} r_{Ii}(\bar{z}) = \left[ \frac{I_{CSi}(\bar{z}) - I_{mi}}{I_{mi}} \right] \\ r_{Di}(\bar{z}) = \left[ \frac{\text{delta}D_i(\bar{z}) - \text{delta}D_{mi}}{\text{delta}D_{mi}} \right] \end{cases} \quad (10)$$

要解决由上述残差平方和函数构成的多目标优化问题, 即 (VP)  $\min_{r \in R^n} \begin{bmatrix} F(\bar{r}_I) \\ F(\bar{r}_D) \end{bmatrix}$ , 需要将其转换成单目标优化进行求解. 本文采用线性加权和法, 将  $N$  组误差函数构成的残差加权平方和作为目标函数<sup>[10]</sup>:

$$\begin{aligned} E(z) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N W_{Ii} \left[ \frac{I_{CSi}(\bar{z}) - I_{mi}}{I_{mi}} \right]^2 + \\ &\quad \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N W_{Di} \left[ \frac{\text{delta}D_i(\bar{z}) - \text{delta}D_{mi}}{\text{delta}D_{mi}} \right]^2 \\ &= \bar{r}(\bar{z})^T W \bar{r}(\bar{z}) \end{aligned} \quad (11)$$

式中  $W_{Ii}, W_{Di}$  为各自的权因子;  $\bar{r}(\bar{z}) = [\bar{r}_I, \bar{r}_D]$ , 且  $\bar{r}_I = [r_{Ii}]$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $\bar{r}_D = [r_{Di}]$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ );  $E(z)$  为含有  $N$  个分量的残差向量. 这一形式最适合采用 L-M 算法得到参数向量的最优值<sup>[11-14]</sup>.

取权系数为 1, 即得到计算公式:  $E(\bar{z}) = \bar{r}(\bar{z})^T \cdot \bar{r}(\bar{z})$ , 从而得到 Jacobian 矩阵梯度表达:  $\nabla E(\bar{z}) = 2J^T \bar{r}(\bar{z})$ . 其中  $E(z)$  的 Hesse 矩阵为:  $H(\bar{z}) = 2J^T J$ . 将目标函数  $E(z)$  在  $z^k$  附近进行二次展开,  $z^k$  为第  $k$  次迭代:

$$\begin{aligned} E(\bar{z} + \bar{z}) &= q^{(k)}(\bar{z}^k) = \bar{r}(\bar{z})^T \cdot \bar{r}(\bar{z}) + \\ &\quad \nabla E(\bar{z}) \bar{z}^k + \frac{1}{2} (\bar{z})^T \nabla^2 E(\bar{z}) \bar{z} \\ &= \bar{r}(\bar{z})^T \cdot \bar{r}(\bar{z}) + 2\bar{r}(\bar{z})^T J \bar{z}^k + \\ &\quad (\bar{z})^T J^T \cdot J \bar{z} \end{aligned} \quad (12)$$

设 (12) 式在  $\bar{z} = \bar{z}^k$  时达到极小值, 有:  $\nabla E(\bar{z})|_{\bar{z}=\bar{z}^k} = 0$ , 由此得到参数矢量的变化量:

$$\bar{z}^k = - (J^T J)^{-1} J^T \bar{r}(\bar{z})|_{\bar{z}=\bar{z}^k} \quad (13)$$

考虑到 Hesse 矩阵  $H(\bar{z}) = J^T J$  的计算值不能保持正定, 会导致  $(J^T J)^{-1}$  产生奇异而溢出, 使计算不稳定, 这里引入一个阻尼因子, 得到修正后的  $\bar{z}^k$ :

$$\bar{z}^k = - (J^T J + I)^{-1} J^T \bar{r}(\bar{z})|_{\bar{z}=\bar{z}^k} \quad (14)$$

如果所求的  $z^k$  满足:  $\text{RE}(z^k) = [E(z^k)/(N - n)]^{1/2}$  ( $> 0, N > n$ ), 则认为  $z^k$  为最终优化结果; 否则, 继续寻找新点  $z^{k+1}$ :

$$\bar{z}^{k+1} = \bar{z}^k + C_k \bar{z}^k \quad (15)$$

式中 系数  $C_k$  的选择应满足一维搜索最优化条件:

$$\min_c E(\bar{z}^k + C \bar{z}^k) = E(\bar{z}^k + C_k \bar{z}^k) \quad (16)$$

在优化提取的过程中, 为了要提高算法稳定性和精度, 必须要解决好两方面的问题: 一是优化参数的灵敏度提高问题; 二是注入电荷量数值求解策略. 为了清楚表明每一个参数对目标函数以及对损伤栅电流和退化量的影响程度, 引入参数灵敏度的概念<sup>[14, 15]</sup>:

$$\begin{cases} S_{\text{obj}} = \frac{-E(\bar{z})}{z_j} \bigg/ \frac{E(\bar{z})}{z_j} \bigg|_{z=z^k} \\ S_{I_g} = \frac{-I_g(\bar{z})}{z_j} \bigg/ \frac{I_g(\bar{z})}{z_j} \bigg|_{z=z^k} \\ S_D = \frac{-\text{delta}D(\bar{z})}{z_j} \bigg/ \frac{\text{delta}D(\bar{z})}{z_j} \bigg|_{z=z^k} \end{cases} \quad (17)$$

式中  $S_{\text{obj}}$  表示目标函数对参数  $z_j$  的相对灵敏度;  $S_{I_g}$  和  $S_D$  分别表示损伤栅电流和退化量  $z_j$  对的相对灵敏度. 参数的相对灵敏度可以反映该参数对整个目标函数的贡献, 还可以反映每个参数对目标函数影响的变化情况, 使我们对每个参数以及其物理意义有进一步的了解.

在需要优化的参数中, 有 3 个量级变化较大的参数: 初始陷阱态密度  $N_0$  的变化范围在  $10^{10} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  量级之间; 陷阱截面系数  $\sigma = 10^{-17} \sim 10^{-19} \text{ cm}^2$ ; 库仑排斥作用下的陷阱态密度  $N = 10^9 \sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ . 直接优化时, 目标函数的一次变化难以使这些参数产生合理范围内的变化. 为了在优化过程中, 参数在适度范围内变化, 往往需要将直接参数优化

转换为间接参数优化策略. 对于上述 3 个参数, 可以这样进行变换:

$$\begin{cases} x_1 = N_0 q / 2 C_{ox} \\ x_2 = 2 C_{ox} / q N \\ x_3 = / q \end{cases} \quad (18)$$

式中  $q$  为库仑电量常数;  $C_{ox}$  为 pMOSFET 栅氧化层电容. 经过上述参数的转换, 将直接优化  $N_0, N_v,$

参数转化为优化  $x_1, x_2, x_3$  这 3 个参数. 通过对间接参数进行优化提取, 最终反推出需要的参数. 表 1 列出了转换前后的优化参数对栅电流  $I_g$  的相对灵敏度值. 从表 1 中可以看到, 3 个参数灵敏度均有较大改善.

表 1 直接参数和间接参数灵敏度对比

Table 1 Parametric sensitivity comparison between direct and indirect parameters

参数名称	直接参数			间接参数		
	$N_0 / \text{cm}^{-2}$	$N / \text{cm}^{-2}$	$/ \text{cm}^2$	$x_1$	$x_2$	$x_3$
上限	$10^{15}$	$10^{13}$	$10^{-17}$	464	215.5	62.4
下限	$10^{10}$	$10^9$	$10^{-19}$	4.64	2.16	0.62
灵敏度	$6.7 \times 10^{-3}$	$2.9 \times 10^{-4}$	$3.2 \times 10^{-3}$	22.6	38.1	100

在预测器件退化量时, 需要一组注入电荷量值, 采用公式  $\int_0^t I_g(t) dt$  计算. 对栅电流  $I_g$  从 0 到  $t$  的定义积分可以看作是计算  $I_g$  在这一时间段内所覆盖的面积, 如图 2 中所示. 阴影部分面积表示在  $t_1$  时刻时栅电流产生的总注入电荷量  $Q_{inj}$ . 为了提高  $Q_{inj}$  的计算速度, 本文采用递推公式完成这一数值积分过程, 在一次递归调用结束后, 即可计算出一组与测试栅电流对应的注入电荷量, 公式描述如下:

$$\begin{cases} Q_{inj}(t_i) = Q_{inj}(t_{i-1}) + 0.5 [I_g(t_i) + I_g(t_{i-1})] (t_i - t_{i-1}) \\ Q_{inj}(0) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

使用上式进行迭代计算, 可以针对指定时刻的栅电流数据, 计算出相应的注入电荷量, 并且在一次递归过程中完成, 提高了参数优化的速度.

### 4 实验与分析

本文针对 pMOSFET 进行了时变栅电流和退化模型参数的多目标全域优化提取, 并将采用了提取参数后的理论模型数据与实验数据进行了比较. 参数提取结果如表 2 所示.

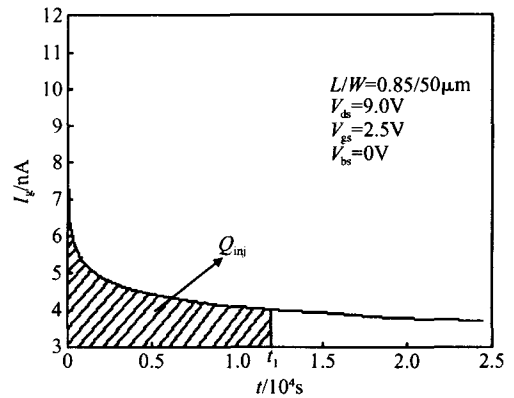


图 2 测试栅电流  $I_g$  随应力时间变化的情况

Fig. 2  $I_g$  changing with stress time  $t$

表 2 优化提取参数结果

Table 2 Result of optimization extracted parameter

参数名称	参数单位	优化结果
$N_0$	$\text{cm}^{-2}$	$4.4735 \times 10^{13}$
$N$	$\text{cm}^{-2}$	$1.0278 \times 10^{11}$
	$\text{cm}^2$	$3.4000 \times 10^{-18}$
$K$	-	0.2040
$B$	-	1.8378
$n$	-	0.2463
$RE(z)$	-	0.0303
迭代次数	-	16

图 3 给出 pMOSFET 的栅电流和跨导退化的实验数据和理论值的对比; 图中理论值的参数提取均采用本文提出的全域优化提取方法. 图 3 (b) 为 3 种漏源电压下, 栅电流实验值与本文提出的时变  $I_g$  模型和经验模型  $A t^n$  的比较. 可以看出, 随着  $V_{ds}$  的减小,  $I_g$  随时间呈对数线性退化的规律出现得越晚, 当  $V_{ds} = 6.5\text{V}$ , 这一规律在 300s 以后才开始; 而  $V_{ds} = 9\text{V}$  时, 大约在 1s 左右就已经开始. 这一趋势与 Dolye 等人<sup>[5]</sup> 观察到的情况相符合. 这一现象与沟道中横向电场和纵向电场的作用有关. 这时采用  $I_g$  经验模型得到的数据就会产生较大的误差. 图 3 (a) 为跨导退化情况实验数据与理论模型的对比. 可以看到, 虽然在  $V_{ds} = 9\text{V}$  时, 采用经验模型的理论值 (— $\times$ —号表示) 与实验数据较为吻合, 但随着  $V_{ds}$  的变化, 与实验数据出现了较大偏差. 偏差的产生主要在于经验  $I_g$  模型不能很好地反映不同电压偏置下  $I_g$  退化趋势. 而采用本文提出的模型, 在所有的电压范围均给出了很好的拟合效果.

总的结果表明, 采用优化提取得到的参数使得器件可靠性模型的仿真结果与测量值具有很好的一

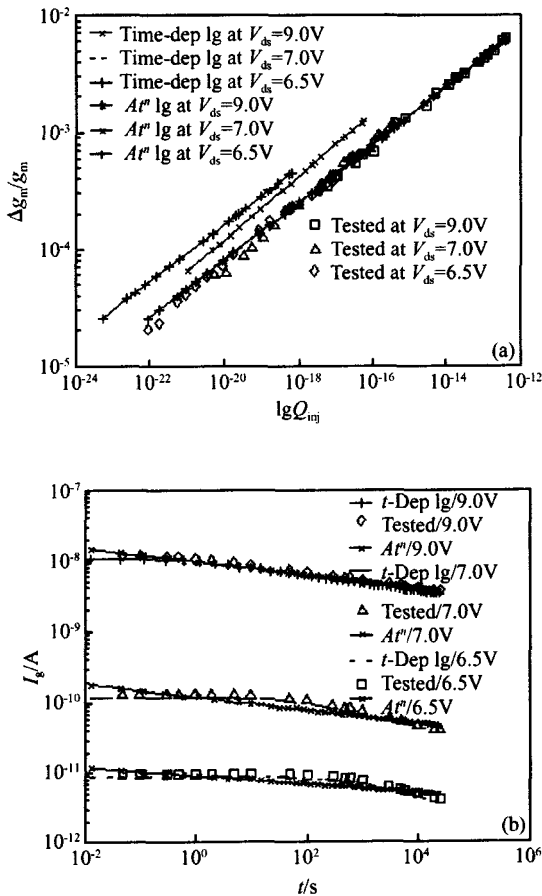


图3 时变模型和经验模型及测量值的对比 (a)  $I_g Q_{inj}$  作为监控量,不同漏电压应力跨导退化量的双对数曲线比较;(b)不同漏源电压下栅电流变化的曲线比较

Fig. 3 Comparison with theory value after parameter's extraction to measured values (a) Comparison of logarithm curves of  $g_m$ 's degradation under different bias;(b) Comparison of curves of  $I_g$  under different bias

致性,最大误差为 4.8%,完全能够满足可靠性分析与设计的需要。

## 5 结论

本文描述了一种采用时变栅电流模型的 pMOSFET 的 HCI 退化模型,重点提出了采用多目标优化算法对模型参数进行全域优化提取的方法。这一方法的优点在于能够较好地反映多个可靠性参数之间的内在联系和相互影响。多目标优化的目标函数可以通过线性加权的方式转化成单目标优化问题,采用 L-M 算法进行优化求解。

通过对优化参数结果分析可以看到,采用优化全域提取得到的模型参数后,HCI 退化模型可以很好地对器件 HCI 退化状况进行预测和评估。将该方法运用到 XDRT 可靠性分析系统中取得了很好的效果。并且这种可靠性参数提取方法可以很方便地用于可靠性电路分析和设计工具,精度高,便于推广,能够为电路可靠性设计环节提供准确的可靠性参数数据。

## 参考文献

- [1] Hu C M, Tam S C, Hsu F C, et al. Hot-electron-induced MOSFET degradation-model, monitor and improvement. IEEE Trans Electron Devices, 1985, 32(2): 375
- [2] Woltjer R, Paulzen G M. Modeling of oxide-charge generation during hot-carrier degradation of pMOSFET's. IEEE Trans Electron Devices, 1994, 41(9): 1639
- [3] Tam S, Ko P K, Hu C M. Lucky-electron model of channel hot-electron injection in MOSFET's. IEEE Trans Electron Devices, 1984, 31(9): 1116
- [4] Hasnat K, Yeap C F, Jallepalli S, et al. A pseudo-lucky electron model for simulation of electron gate current in submicron NMOSFET's. IEEE Trans Electron Devices, 1996, ED-43(8): 1264
- [5] Doyle B S, Mistry K R. A lifetime prediction method for hot-carrier degradation in surface-channel p-MOS devices. IEEE Trans Electron Devices, 1990, 37(5): 1301
- [6] Doyle B S, Mistry K R. The characterization of hot-carrier damage in p-channel transistors. IEEE Trans Electron Devices, 1993, 40(1): 152
- [7] Huang D, King E E, Palkuti L J. Characterization of hot-carrier-induced degradation in p-channel MOSFETs by total injected charge techniques. Proc IRPS, 1994: 34
- [8] So L L, Kan E, Yu Zhiping, et al. A self-consistent approach to substrate current simulation in submicron MOSFETs. International Electron Devices and Materials Symposium, 1994: 1, 7, 25
- [9] Tang Yusheng, Hao Yue, Zhu Jiangang, et al. Degradation model of the electron gate current in pMOSFET. International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology, 2001: 1014
- [10] Lin Cuoyun, Dong Jiali. Multiple objective optimization method and theory. Jilin: Jilin Education Publisher, 1992 (in Chinese) [林铨云,董加礼.多目标优化的方法和理论.吉林:吉林教育出版社,1992]
- [11] Joshi M C, Moudgalya K M. Optimization theory and practice. Harrow: Alpha Science, 2004
- [12] Strongin R G, Sergeyev Y D. Global optimization with non-convex constraints. Boston: Kluwer Academic Publishers,

- 2000
- [13] Gen Pei, Kan E C C. A physical compact model of DG MOS-FET for mixed-signal circuit applications-part II: parameter extraction. *IEEE Trans Electron Devices*, 2003, 50(10): 2144
- [14] Fager C, Peter L J, Pedro J C. Optimal parameter extraction and uncertainty estimation in intrinsic FET small-signal models. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2002, 50(12): 2797
- [15] Hao Yue, Jia Xinzhang. The optimal parameter extraction for MOSFET model in the whole region. *Journal of Xidian University*, 1988, 15(4): 48 (in Chinese) [郝跃, 贾新章. MOSFET 模型参数的全域优化提取. *西安电子科技大学学报*, 1988, 15(4): 48]

## A Multi-Objective Global Optimization Extraction for HCI Model Parameters in Deep-Submicron Devices \*

Li Kang, Hao Yue, Liu Hongxia, Ma Xiaohua, and Ma Peijun

(Key Laboratory of Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, School of Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** A hot carrier injection degradation model for a DSM (deep submicron) pMOS device is studied, which is based on the physical model of a degradation gate current. A multi-objectives global optimization extracting method for reliability parameters realized by L-M (Levenberg-Marquardt) algorithms is proposed. The lower parametric sensitivity issues are analyzed and solved. A recursion algorithm for quantities of injected charges is proposed for accelerating the process. Finally, the results of optimal parameters are listed from both the theory and the measurements for comparison.

**Key words:** HCI; time-dependence gate current model; parameter extraction

**EEACC:** 0260; 2560B      **PACC:** 7220J

**Article ID:** 0253-4177(2005)10-2038-06

---

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2003AA1Z163) and the National Natural Science Foundation of China (No. 60206006)

Li Kang male, was born in 1973, PhD candidate. He is engaged in research on semiconductor devices reliability.

Hao Yue male, was born in 1958, professor, supervisor of PhD candidates. He is engaged in research on modeling and characterization of deep submicron devices and circuits.

Received 17 January 2005, revised manuscript received 1 June 2005

© 2005 Chinese Institute of Electronics