

全耗尽 SOI MOSFET 辐照导致的阈值电压漂移模型

万新恒, 张 兴, 谭静荣, 高文钰, 黄 如, 王阳元

(北京大学微电子学研究所, 北京 100871)

摘 要: 报道了全耗尽 SOI MOSFET 器件阈值电压漂移与辐照剂量和辐照剂量率之间的解析关系. 模型计算结果与实验吻合较好. 该模型物理意义明确, 参数提取方便, 适合于低辐照总剂量条件下的加固 SOI 器件与电路的模拟. 讨论了抑制阈值电压漂移的方法. 结果表明, 对于全耗尽 SOI 加固工艺, 辐照导致的埋氧层 (BOX) 氧化物电荷对前栅的耦合是影响前栅阈值电压漂移的主要因素, 但减薄埋氧层厚度并不能明显提高 SOI MOSFET 的抗辐照性能.

关键词: SOI MOSFET; 辐照效应; 阈值电压漂移模型; 剂量率

中图分类号: TN304 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 11-1519-03

A New Threshold Voltage Shift Model Due to Radiation in Fully-Depleted SOI MOSFET

WAN Xin-heng, ZHANG Xing, TAN Jing-rong, GAO Wen-yu, HUANG Ru, WANG Yang-yuan

(Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: A new approach to model the radiation-induced threshold voltage shift in fully-depleted SOI MOSFET has been implemented for circuit simulations. The model is validated by comparison of simulated and measured post-radiation device characteristics of MOSFETs in the literature. The model has such advantages as simple analytic expression, clear physical meaning, and easy extraction of used parameters. The model can be used as a basic circuit simulation tool for analysing hardened SOI MOS transistors exposed to a nuclear environment in the low-dose range. Additionally, the discussion presented here supports that the large top threshold voltage shift of the fully-depleted MOSFET is attributed to the large radiation induced oxide charge in the buried oxide which was coupled to the top gate. Thinner buried oxides, which are less dose sensitive than thicker ones, can not necessarily improve the radiation hardness of fully-depleted transistors because of the higher coupling effect.

Key words: SOI MOSFET; radiation effects; threshold voltage shift model; dose rate

1 引言

电离辐照引起 MOS 器件的最主要性能退化是阈值电压漂移, 并认为是辐照感生的 Si/SiO₂ 界面态和栅氧化层中的氧化物电荷所引起. 国际上对于体硅及 SOI MOS 器件因辐照引起的阈值电压漂移方面的研究大多集中于辐照试验及加固工艺方面, 在辐照机理和模型方面的研究正在不断深入^[1~8].

以 n 沟增强型 MOSFET 为例, 阈值电压漂移可表示为^[1]:

$$V_T = - (q / C_{ox}) N_{ot} + (q / C_{ox}) N_{it} = N_{ot} + N_{it} \quad (1)$$

其中 q 为电子电量, C_{ox} 为氧化层电容, $q N_{ot}$ 、 $q N_{it}$ 分别为氧化层陷阱电荷和界面陷阱电荷.

进一步可导出阈值电压漂移与辐照剂量之间的半经验关系式^[2]:

$$V_T = V_{ot} + V_{it} = 5.14 \times 10^{-7} \{ t_{ox} \}^2_{mm} \cdot L \cdot 7.47 \{ D \} \phi_p F(E, \lambda) F_t + \{ D \} \phi_p^{2/3} \quad (2)$$

其中 D 为辐照剂量, t_{ox} 为氧化层厚度, F_t 为经验参数, $F(E, \lambda)$ 为与电场 (E) 和辐射粒子能量 (λ) 相关的空穴产生率. 上式忽略了辐照剂量率的影响, 考虑辐照感生界面陷阱电荷的影响时采用了经验式. 上式只适用于 1×10^5 rad (Si) 或者更低的辐照总剂量条件.

对 SOI 器件, 由于比体硅 MOS 器件多一埋氧层 (BOX), 也就多了一个总剂量辐照敏感区. 与部分耗尽 SOI 器件相比, 全耗尽 SOI 器件因前、背栅耦合, 辐照感生的埋氧层陷阱电荷和界面陷阱电荷对其顶沟 MOS 产生更为明显的影响, 而对辐照更为敏感. 如埋氧层中辐照引起的陷阱正电荷使背沟界面反型, 导致漏电流增大, 尤其是在导通偏置时.

目前, 大多仍沿用式 (1) 反映 MOSFET 阈值电压的漂移, 对部分耗尽 SOI MOSFET 也近似采用式 (1), 但尚无适合于抗辐照电路模拟的全耗尽 SOI MOSFET 阈值电压漂移模型, 尤其是阈值电压漂移与辐照剂量率的关系还未见报道^[3]. 基于此, 本文进一步导出了全耗尽 SOI MOSFET 阈值电压漂移与辐照剂量和辐照剂量率关系的解析模型.

2 模型建立

下面, 首先从物理角度导出氧化层陷阱电荷引起的 MOSFET 阈值电压漂移与辐照剂量和辐照剂量率之间的关系式.

一般认为电离辐照在 SiO₂ 中激发出电子空穴对, 电子很快迁移出 SiO₂, 而空穴则一部分迁移出 SiO₂, 一部分被 SiO₂ 中的深空穴陷阱俘获成为正的固定空间电荷^[1].

在低剂量辐照条件下, 根据 CTRW 模型^[1], 退火函数

收稿日期: 2000-12-18; 修回日期: 2001-01-31

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金 (No. 6001161936); "973" 国家重点基础研究发展规划项目 (No. G2000036503)

$g(t)$ 可表述为:

$$g(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1 - 0.5(t/t_{1/2})^2, & 0 \leq t \leq t_{1/2} \\ 0.5(t/t_{1/2})^{-1}, & t > t_{1/2} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $t_{1/2}$ 为陷阱电荷的一半发生复合所需要的时间, 为常数.

假设在辐照脉冲 $D(t)$ 作用下, 考虑退火影响, $V_{\alpha} = M D g(t)$, M 为常数; 在稳态辐照条件下, $D = D t$, D 为剂量率. V_{α} 可以通过辐照和退火过程的卷积来计算, 则:

$$V_{\alpha}(t) = M \int_0^t g(t-t') D dt' \quad (4)$$

将式(3)代入上式, 经过推导最后可得:

$$V_{\alpha}(t) = \frac{M}{2(1-\tau)} t_{1/2} D t^{1-\tau} + \frac{1}{4} M D t_{1/2} \frac{-4-t^2}{1-t^2} \quad (5)$$

当 $t \gg t_{1/2}$ 时, 上式可以简化为:

$$V_{\alpha}(t) = [M/2(1-\tau)] t_{1/2} D t^{1-\tau} \quad (6)$$

又 $D = D t$, 代入上式得:

$$V_{\alpha}(t) = [M/2(1-\tau)] t_{1/2} D t^{1-\tau} \quad (7)$$

由于实际测量时并没有辐照, 上式再乘以退火因子 $g(t_M - t)$ 以考虑这部分的影响, 其中 t 为辐照结束的时间, t_M 为测量时的时间, 则:

$$V_{\alpha}(t) = \frac{M}{2(1-\tau)} g(t_M - t) t_{1/2} D t^{1-\tau} \quad (8)$$

这即是在低剂量辐照条件下, 氧化层陷阱电荷引起的 MOSFET 阈值电压漂移与辐照剂量和辐照剂量率之间的关系式. 可见, 对于给定的 τ 值, 氧化层陷阱电荷引起的阈值电压的漂移量是剂量率的 τ 次幂, 是辐照总剂量的 $1-\tau$ 次幂. 其中 τ 值和 M 值可通过已知的阈值电压漂移量与总剂量和剂量率的测量数据来确定. 从而可以进一步预测在给定总剂量或者剂量率的情况下, 氧化层陷阱电荷引起的阈值电压漂移量随剂量率或者总剂量的变化.

对全耗尽 SOI MOS 器件, 由于前栅氧化层电荷和 BOX 中辐照导致的氧化层电荷之间的耦合, 阈值电压漂移更大. 全耗尽 SOI MOS 器件顶沟和背沟 MOS 阈值电压漂移可分别表述为^[3]:

$$V_{TF} = V_{TFO} + K_1 V_{TBO} \quad (9)$$

$$V_{TB} = V_{TBO} + K_2 V_{TFO} \quad (10)$$

其中, V_{TFO} 是辐照导致的前栅阈值电压漂移, 可以通过背栅晶体管处于积累模式来确定. V_{TBO} 是埋氧层陷阱电荷引起的背栅阈值电压漂移. V_{TFO} 与 V_{TBO} 可从式(8)导出. K_1 和 K_2 为耦合系数, 可表述为:

$$K_1 = C_{Si} C_{ob} / [C_{gf} (C_{Si} + C_{ob} + C_{ib})] \quad (11)$$

$$K_2 = C_{Si} C_{gf} / [C_{ob} (C_{Si} + C_{gf} + C_{ib})] \quad (12)$$

其中, C_{gf} , C_{ob} 分别为氧化层电容和埋氧层电容, C_{Si} 为硅膜耗尽层电容, C_{gf} , C_{ob} 和 C_{Si} 不随辐照剂量变化, C_{ib} 为随辐照剂量变化的背界面态电容. K_1 可以通过测量背耗尽模式情况下的 $V_{TF}-V_B$ 曲线得到^[3].

为简化起见, 对于全耗尽 SOI 加固工艺, C_{ib} 可以忽略^[6],

而 $C_{Si} \gg C_{ob}$, 则式(9)可近似计算为:

$$K_1 \approx C_{ob} / C_{gf} = t_{gf} / t_{ob} \quad (13)$$

实验结果表明^[6], 对全耗尽 SOI 加固工艺, 辐照导致的氧化物电荷增加较多, 而界面态变化不大, 且当栅氧厚度减小时, 辐照导致的前栅阈值电压漂移 V_{TFO} 远小于 V_{TBO} , 则式(9)可近似为:

$$V_{TF} \approx K_1 V_{TBO} \frac{K_1 M}{2(1-\tau)} g(t_M - t) t_{1/2} D t^{1-\tau} \quad (14)$$

3 实验结果及讨论

利用我们开发的 1.0 μm CMOS/SOI 抗辐照加固工艺制备了大量的薄膜全耗尽 SOI MOS 器件和电路^[4]. SOI 材料的表面硅层和埋氧化层厚度分别为 100nm 和 390nm, 栅氧化层厚度为 20nm. 采用全离子注入工艺, 详见文献[4]. 在截止偏置(N管: $V_g = V_s = 0\text{V}$, $V_d = 3.0\text{V}$; P管: $V_g = V_s = 3.0\text{V}$, $V_d = 0\text{V}$)及导通偏置(N管: $V_g = 3.0\text{V}$, $V_d = V_s = 0\text{V}$; P管: $V_g = 0\text{V}$, $V_d = V_s = 3.0\text{V}$)下, 用西北核技术研究所的 60Co 源进行 γ 射线辐照试验. 辐照总剂量最高达 $1 \times 10^6 \text{rad}(\text{Si})$. 每次辐照后立即在由计算机控制的 HP4140B 测试仪上完成测试, 整个过程约在一天内完成. 忽略辐照实验过程中可能存在的退火效应. 用 $(I_d - V_g)^{1/2}$ 法定出 MOSFET 经不同剂量辐照后的阈值电压, 用亚阈值特性曲线 $I_d - V_g$ 延长技术可以确定 V_{α} (辐照在栅氧化层中产生的陷阱正电荷引起的阈值电压漂移) 和 V_{it} (辐照在 Si/SiO₂ 界面产生新的界面态电荷引起的阈值电压漂移).

下面利用发表的一些辐照试验数据对该模型作进一步的分析和讨论. 图 1 为我们测试的 CoSi₂ SALICIDE 结构全耗尽 SOI MOSFET 前沟阈值电压漂移量与辐照剂量关系的实验数据^[4]和模拟结果比较. 辐照剂量率为 52rad(Si)/s. 对 NMOSFET, $\tau = 0.555$, 模拟结果相关系数 $R_1 = 0.99701$; 对 PMOSFET, $\tau = 0.513$, 模拟结果相关系数 $R_2 = 0.99655$. 比较 V_{th} 和 V_{α} 与辐照剂量和辐照剂量率的关系, 发现均近似成指数幂的关系, 而且参数 τ 差别不大. 例如对图 1 的 NMOSFET, 对 V_{th} , $\tau = 0.555$; 对 V_{α} , $\tau = 0.573$. 可见, 该加固 SOI MOSFET 前沟阈值电压的漂移可近似通过式(14)来描述, 这说明忽略辐照导致的背界面态陷阱电荷是可行的, 埋氧中因辐照导致的氧化物电荷对前栅的耦合是影响阈值电压漂移的主要因素, 这与文献[3]中的结论是一致的.

图 2 为 NMOSFET 阈值电压漂移量与辐照剂量率关系的实验数据^[5]及其模拟结果比较. 辐照总剂量分别为 $1 \times 10^5 \text{rad}(\text{Si})$ 和 $5.5 \times 10^4 \text{rad}(\text{Si})$, 模拟结果相关系数分别为 $R_1 = 0.78423$ 和 $R_2 = 0.78488$. 常数 M 均约为 0.75.

图 3 为全耗尽 SOI MOSFET 和体硅 MOSFET 阈值电压漂移与辐照剂量的关系. SOI 以及体硅 NMOSFET 均处于导通偏置条件, SOI 以及体硅 PMOSFET 均处于截止偏置条件. 栅氧化层厚度均为 20nm, W/L 均为 80/4. 可见, 由于没有了埋层氧化层, 体硅 MOSFET 具有较小的阈值电压漂移. 对于全耗尽 SOI 加固工艺, 可以忽略背界面态电荷的影响, 埋氧中因辐照导致的氧化物电荷对前栅的耦合是影响阈值电压漂移的主要因素. 减薄埋氧层厚度, 可相应减少辐照导致的氧化物陷阱电

荷的积累,但研究表明,减薄埋氧层厚度并不能明显提高 N 沟 SOI MOSFET 的抗辐照性能,这是因为埋氧层厚度减薄使得前背栅的耦合作用反而加强。减小阈值电压漂移的有效方法

是高温退火(如 400 °C,30 分钟)^[6]或者采用新型的外围电路调整技术^[7]。有的作者甚至认为,体引出结构(body tie)是消除 FD 器件因辐照引起的寄生结构的唯一办法^[3]。

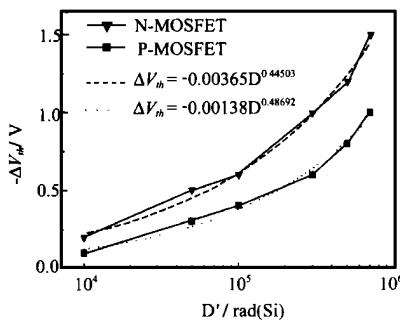


图 1 全耗尽 SOI MOSFET 前沟阈值电压漂移量与辐照剂量关系的实验数据^[3]和模拟结果的比较。

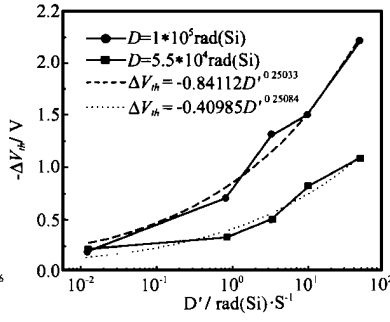


图 2 NMOSFET 阈值电压漂移与辐照剂量率关系的实验数据^[5]及其模拟结果的比较。

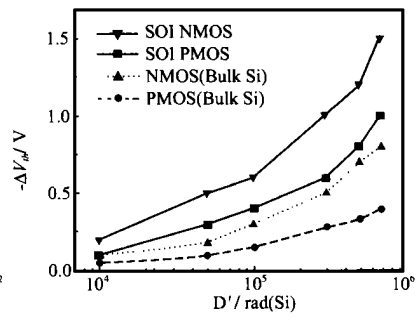


图 3 全耗尽 SOI MOSFET 和体硅 MOSFET 阈值电压漂移与辐照剂量的关系。

本文提出的模型是从 CTRW 模型导出,尤其适用于经过氧化层加固的样品^[1],主要适合于低总剂量和低剂量率辐照条件。实验模拟结果表明,该模型还适用于模拟 P 沟道 MOSFET 在高剂量辐照条件下的情况。对于 N 沟 MOSFET 器件,在截止偏置条件下,阈值电压先向负漂移,在达到某一高剂量辐照时(如 1×10^5 rad(Si)),阈值电压开始向正漂移,表明此时界面态的影响已经超过了栅氧化层陷阱电荷的影响,补偿了部分正空间电荷的作用,使阈值电压的漂移得到部分恢复。这是因为 Si/SiO₂ 界面新生界面态俘获电子使 NMOS 阈值电压向正漂移的过程是一个长时间过程,而栅氧化层产生陷阱空穴使阈值电压向负漂移的过程是一个短时间过程。对于高剂量辐照条件下的 N 沟 MOSFET 器件,由于存在这种回漂现象(Rebound),可采用其它方法来模拟^[8]。

由于埋氧(BOX)的存在导致 SOI 器件抗总剂量效应反而比体硅差,因此 SOI 技术应用于抗辐照领域,首先要考虑总剂量加固水平,其关键是抑制两个寄生管的导通(背沟和侧沟 MOS 管),减少阈值电压的漂移。但仅仅考虑减少阈值电压的漂移量,对 N 沟道 MOSFET 有时会产生误导。如在一些辐照环境下,氧化层陷阱电荷与界面态电荷会中和,导致非常小的阈值电压漂移量^[1]。而此时,氧化层陷阱电荷与界面态电荷成分都很大,器件抗总剂量效应的水平下降。由此可见,提高 SOI 器件抗总剂量加固水平应该从根本上减少栅介质和埋氧中的氧化层陷阱电荷以及栅介质/Si 和 Si/BOX 处的界面态电荷。与 FD 器件相比,PD 器件因在辐照环境下仍能保持良好的电学特性而在抗辐照领域得到广泛应用。

4 结论

从 CTRW 模型出发,导出了全耗尽 SOI MOSFET 器件阈值电压漂移与辐照剂量和辐照剂量率之间的解析关系。模型计算结果与实验吻合较好。该模型物理意义明确,参数提取方便,适合于低辐照总剂量、低辐照剂量率条件下的 SOI 器件与电路的模拟。并讨论了抑制阈值电压漂移的方法。结果表明,对于全耗尽 SOI 加固工艺,辐照导致的埋氧层(BOX)氧化物电荷对前栅的耦合是影响前栅阈值电压漂移的主要因素。减

薄埋氧层厚度,可相应减少辐照导致的氧化物陷阱电荷的积累,但不能明显提高 N 沟 SOI MOSFET 的抗辐照性能,这是因为埋氧层厚度减薄使得前背栅的耦合作用反而加强。

参考文献:

- [1] T P Ma, P V Dressendorfer. Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits [M]. A Wiley-Interscience Publication, 1989.
- [2] 赖祖武. 抗辐射电子学——辐射效应及加固原理 [M]. 北京:国防工业出版社, 1998:73 - 76.
- [3] V F Cavois, O Musseau, J L Leray. Total dose effects on a fully-depleted SOI NMOS and its lateral parasitic transistor [J]. IEEE Trans. Elec. Dev., Jun. 1997, 44(6): 965 - 971.
- [4] 张兴, 黄如, 王阳元. 采用 CoSi₂ SALICIDE 结构 CMOS/SOI 器件辐照特性的实验研究 [J]. 半导体学报, 2000, 21(5): 460 - 464.
- [5] R D Schrimpf, P J Wahle, R C Andrews. Dose rate effects on the total dose threshold voltage shift of power MOSFETs [J]. IEEE Trans. Nuclear science, Dec. 1988, 35(6): 1536 - 1540.
- [6] M N Levin, S G Kadmsky, V S Pershenkov. The X-ray and UV Controlled Adjustment of MOSFET Threshold Voltage [M]. Proc. 22nd international conference on microelectronics (MIEL 2000), Serbia, 14 - 17, May, 2000, 1: 335 - 337.
- [7] D V kerns, H J Barnaby, S E kerns. Threshold voltage stabilization in radiation environments [J]. IEEE Trans. Nuclear Science, Dec, 1998, 45(6): 3175 - 3178.
- [8] A H Siedle, L Adams. Mapping CMOS radiation tolerance data on a 4-lane chart [J]. IEEE Trans. Nuclear Science, Dec, 1994, 41(6): 2613 - 2618.

作者简介:



万新恒 男, 1972 年 12 月生于湖北孝感。现于北京大学计算机系攻读博士学位, 发表第一作者论文十余篇。主持创作信息化校园(i-Campus): 大学的革命和珍惜光明。曾获北京大学最高荣誉“五四奖章”。现任中华全国青年联合会第九届委员会委员、北京大学电子商务研究会理事长等职。