

总剂量辐照效应对窄沟道 SOI NMOSFET 器件的影响

宁冰旭^{1)2)†} 胡志远¹⁾ 张正选¹⁾ 毕大炜¹⁾ 黄辉祥¹⁾²⁾
戴若凡¹⁾²⁾ 张彦伟¹⁾²⁾ 邹世昌¹⁾

1) (中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2012 年 10 月 10 日收到; 2012 年 10 月 29 日收到修改稿)

本文深入研究了 130 nm Silicon-on-Insulator (SOI) 技术下的窄沟道 n 型 metal-oxide-semiconductor-field-effect-transistor (MOSFET) 器件的总剂量辐照效应. 在总剂量辐照下, 相比于宽沟道器件, 窄沟道器件的阈值电压漂移更为明显. 论文利用电荷守恒定律很好地解释了辐照增强的窄沟道效应. 另外, 本文首次发现, 对于工作在线性区的窄沟道器件, 辐照产生的浅沟槽隔离氧化物 (STI) 陷阱正电荷会增加沟道区载流子之间的碰撞概率和沟道表面粗糙度散射, 从而导致主沟道晶体管的载流子迁移率退化以及跨导降低. 最后, 对辐照增强的窄沟道效应以及迁移率退化进行了三维器件仿真模拟, 仿真结果与实验结果符合得很好.

关键词: 总剂量效应 (TID), 浅沟槽隔离 (STI), 氧化层陷阱正电荷, SOI MOSFET

PACS: 61.80.Ed, 73.50.Dn, 85.35.-p

DOI: 10.7498/aps.62.076104

1 引言

相对于体硅 CMOS 技术, SOI 技术具有高速、低功耗、高集成度、短沟道效应小和抗辐射等先天性的优势^[1,2]. 由于全介质隔离和最小化的有源区, SOI 技术具有很好的抗单粒子效应和抗单粒子闩锁特性^[3]. 然而, 总剂量辐照会在栅氧中引入氧化层陷阱电荷和界面态, 这不仅导致阈值电压漂移, 还会伴随迁移率降低和跨导退化^[4]. 另外, STI 在总剂量辐照下同样会引入陷阱正电荷, 这些电荷在电场作用下移动至氧化物/硅区界面, 使得侧壁反型, 从而形成从漏端到源端的关态泄漏电流^[4-7]. 更为严重的是, 辐照在埋氧层 (BOX) 中引入的陷阱正电荷会导致 SOI 器件背沟道耗尽甚至反型, 从而产生漏极到源极的关态漏电流^[8-12]. 因此, SOI 器件的总剂量辐照效应要比体硅器件复杂得多. 近些年来, 国内外对大尺寸 SOI 器件的总剂量辐照效应已有大量的研究^[13,14], 但对于窄沟道器件, 目前还缺乏实验数据.

本论文中, 我们以 130 nm SOI CMOS 工艺下的窄沟道 NMOS 器件作为研究对象, 探讨了总剂量辐照效应对其的影响. 研究发现, 在窄沟道器件中, 辐照引起的 STI 陷阱电荷会影响主晶体管的阈值电压, 这是因为 STI 控制的耗尽层电荷占栅控制的耗尽层电荷的比例增大. 另外, 辐照产生的 STI 陷阱正电荷由于距离主沟道区载流子很近, 会增加载流子之间的碰撞概率, 在低漏端电压下会导致主晶体管的载流子迁移率退化以及强反型区跨导降低. 最后, 我们通过三维器件仿真分析更好地理解总剂量辐照效应对窄沟道器件的影响.

2 器件辐照实验

实验样品为 130 nm 部分耗尽 SOI CMOS 工艺体接触 NMOSFET, 器件采用浅沟槽隔离技术, 埋氧层 (BOX) 和顶层硅厚度分别为 145 nm 和 100 nm. 实验选取输入输出器件 (I/O NMOS), 器件尺寸包括 $W/L = 10 \mu\text{m}/10 \mu\text{m}$ 和 $W/L = 0.15 \mu\text{m}/10 \mu\text{m}$ 两类, 栅氧厚度为 6.8 nm, 工作电压为 3.3 V, 所有器件

† 通讯作者. E-mail: ningbx@mail.sim.ac.cn

均为陶瓷封装. 辐照源为中国科学院新疆理化技术研究所 $^{60}\text{Co}\gamma$ 射线源, 剂量率约为 1000 Gy/s , 最大总剂量达到了 3000 Gy . 在器件辐照过程中, 采用了三种辐照偏置, 分别为 ON 偏置、OFF 偏置和 TG 偏置(如表 1 所示). 在辐照之前和每次辐照之后, 采用安捷伦公司的 HP 4140B 精密半导体参数分析仪测试器件的 $I_{\text{DS}}\text{-}V_{\text{GS}}$ 曲线 ($V_{\text{DS}} = 0.1\text{ V}$, $V_{\text{Sub}} = 0\text{ V}$). 两次辐照之间的时间控制在半个小时之内.

表 1 辐照偏置

偏置条件	源极/V	漏极/V	栅极/V	体端/V	衬底/V
ON	0	0	3.3	0	0
OFF	0	3.3	0	0	0
TG	3.3	3.3	0	0	0

3 结果与分析

3.1 总剂量辐照增强的窄沟道效应

图 1 为在 ON 辐照偏置下, $W/L = 0.15\text{ }\mu\text{m}/10\text{ }\mu\text{m}$ 和 $W/L = 10\text{ }\mu\text{m}/10\text{ }\mu\text{m}$ 的输入输出 NMOS 器件的前栅阈值电压漂移(以下的阈值电压漂移均指前栅阈值电压漂移)随总剂量的变化关系. 这里, 所有的阈值电压都是通过最大跨导法提取的. 从图中可以看到, 对于宽沟道器件, 在 3000 Gy 辐照后, 阈值电压漂移量小于 50 mV . 而对

于窄沟道器件, 总剂量为 500 Gy 时, 阈值电压漂移约为 60 mV , 当总剂量增加到 3000 Gy 后, 阈值电压漂移已经达到 180 mV . 实际上, 阈值电压漂移包括栅氧引起的阈值电压漂移 (ΔV_{GOX}) 和 STI 引起的阈值电压漂移 (ΔV_{STI}) 两部分. 对于宽沟道器件, 阈值电压漂移主要由 ΔV_{GOX} 来决定. 而窄沟道器件的阈值电压漂移是 ΔV_{GOX} 和 ΔV_{STI} 共同作用的结果. 这种总剂量辐照引起的窄沟道器件阈值电压漂移增强的现象称为辐射导致的窄沟效应 [15]. 在窄沟道器件中, STI 氧化层俘获的陷阱正电荷不仅决定寄生晶体管的阈值电压, 也会影响主晶体管的阈值电压. 这可以通过图 2 所示的电荷分享模型来解释.

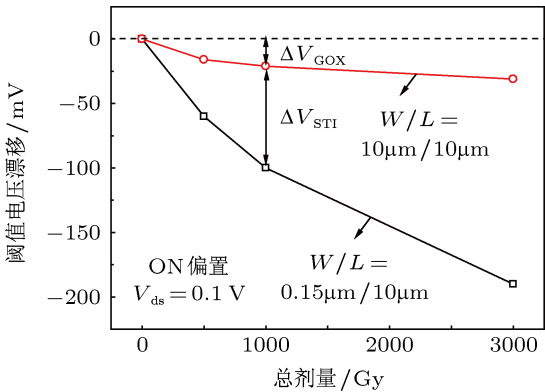


图 1 在 ON 辐照偏置下, 输入输出 NMOS 器件 ($W/L = 0.15\text{ }\mu\text{m}/10\text{ }\mu\text{m}$ 和 $W/L = 10\text{ }\mu\text{m}/10\text{ }\mu\text{m}$) 的前栅阈值电压漂移随总剂量的变化关系

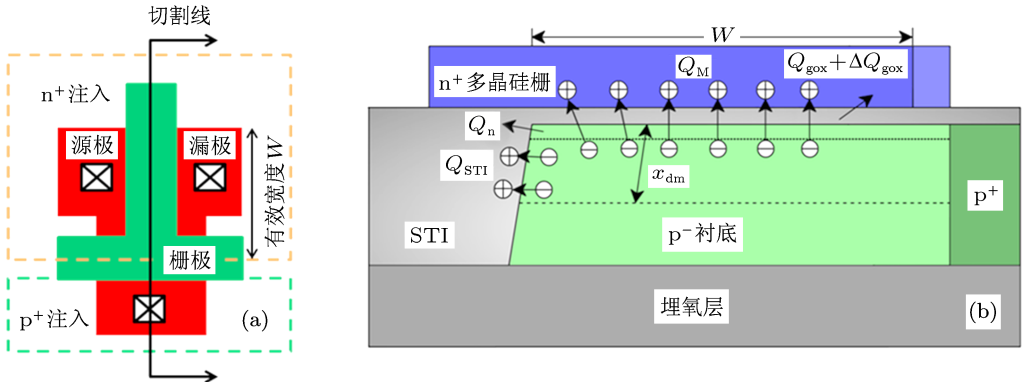


图 2 器件版图结构俯视图以及剖面图 (a) SOI NMOSFET 版图结构; (b) 电荷分享模型

栅极、沟道、栅氧和 STI 氧化物中的电荷遵循电荷守恒定律:

$$Q_{\text{STI}} + Q_{\text{M}} + Q_{\text{gox}} + \Delta Q_{\text{gox}} + Q_{\text{n}} + Q_{\text{B}} = 0, \quad (1)$$

式中, $Q_{\text{STI}}(> 0)$ 为耗尽区以上的 STI 侧壁中总的正俘获电荷, $Q_{\text{M}}(> 0)$ 为多晶硅栅中的总的电荷,

$Q_{\text{gox}}(> 0)$, 包括氧化层陷阱电荷和界面态) 为辐射之前栅氧中存在的原始有效电荷, ΔQ_{gox} 为辐射之后栅氧中新产生的总的有效电荷, $Q_{\text{n}}(< 0)$ 为总的反型层电荷, $Q_{\text{B}}(< 0)$ 则为耗尽区杂质电离总的电荷. 在辐照前, 可以认为 $Q_{\text{STI}} = \Delta Q_{\text{gox}} = 0$, 此时阈值电

压 V_{th} 可以表示为

$$V_{th} = \psi_{MS} + 2\psi_B - \frac{Q_{gox}}{C_{ox}A} - \frac{Q_B}{C_{ox}A}, \quad (2)$$

式中, ψ_{MS} 为前栅与 p 型体区之间的功函数差, $2\psi_B$ 为在阈值电压时的表面势, C_{ox} 为前栅氧的单位面积电容, A 为前栅的面积 ($A = W \times L$).

在辐照之前, 电荷 Q_M 和 Q_B 平衡, 但是在辐照之后 Q_{STI} 也可以平衡一部分 Q_B . 这样, 需要用来平衡所有耗尽层电荷的 Q_M 减少了, 所以主晶体管的阈值电压降低. 因此, 辐照之后 (2) 式改为

$$V_{th,rad} = \psi_{MS} + 2\psi_B - \frac{Q_{gox} + \Delta Q_{gox}}{C_{ox}A} - \frac{Q_B + Q_{STI}}{C_{ox}A}. \quad (3)$$

需要注意的是, $Q_B < 0$ 而 $Q_{STI} > 0$, 有效耗尽层电荷减少为 $Q_{STI} + Q_B$, 而不是 $Q_{STI} - Q_B$. 根据 (2) 和 (3) 式, 可以得到辐照之后阈值电压漂移为

$$\Delta V_{th} = -\frac{\Delta Q_{gox}}{C_{ox}A} - \frac{Q_{STI}}{C_{ox}A}. \quad (4)$$

如果我们定义

$$\Delta V_{GOX} = -\frac{\Delta Q_{gox}}{C_{ox}A}, \quad (5)$$

$$\Delta V_{STI} = -\frac{Q_{STI}}{C_{ox}A}, \quad (6)$$

那么,

$$\Delta V_{th} = \Delta V_{GOX} + \Delta V_{STI}, \quad (7)$$

其中, ΔV_{GOX} 是由于栅氧退化导致的阈值电压漂移, ΔV_{STI} 则是 STI 氧化层退化导致的阈值电压漂移. 一级近似计算 ΔQ_{gox} 和 Q_{STI} , 可以认为栅氧中的俘获电荷和沿着 STI 侧壁的俘获电荷的密度是均匀分布的, 分别记为 $N_{t,gox}$ 和 $N_{t,STI}$, 单位为 cm^{-2} . 因此, ΔQ_{gox} 和 Q_{STI} 可以计算如下:

$$\Delta Q_{gox} = qAN_{t,gox}, \quad (8)$$

$$Q_{STI} = Lx_{dm}qN_{t,STI}. \quad (9)$$

结合 (4), (8) 和 (9) 式, 阈值电压漂移为

$$\Delta V_{th} = -\frac{qN_{ot,gox}}{C_{ox}} - \frac{x_{dm}qN_{ot,STI}}{C_{ox}W}. \quad (10)$$

从 (10) 式可以看出, 阈值电压漂移与器件沟道宽度 W 成反比例关系, 当沟道宽度很大时, (10) 式右边第二项由 STI 引起的阈值电压漂移可以忽略. 但是, 在窄沟道器件中, 辐照引起的 STI 氧化物中的陷阱电荷对阈值电压漂移就显得很重要. 因此, 我们可以在图 1 中观察到明显的阈值电压漂移.

3.2 总剂量辐照增强的迁移率退化效应

之前的研究已经表明, 总剂量辐照在栅氧与沟道界面处产生的界面态可以与沟道的载流子相互作用, 使得器件的迁移率退化, 进而导致跨导的下降 [16]. 但是, 我们还首次发现, 辐照产生的 STI 陷阱正电荷同样会造成工作在线性区的窄沟道器件的迁移率退化. 图 3 和图 4 分别为工作在线性区的窄沟道 ($W/L = 0.15 \mu\text{m}/10 \mu\text{m}$) 和宽沟道 ($W/L = 10 \mu\text{m}/10 \mu\text{m}$) 输入输出 NMOS 器件在 ON 辐照偏置下的归一化跨导 (跨导/ μm 沟道宽度) 随总剂量辐照的变化关系. 对于窄沟道器件, 在强反型区, 归一化跨导随总剂量增加而降低, 而宽沟道器件的归一化跨导却基本不变.

对于 NMOS 器件而言, 在线性区, 漏端电流 I_{ds} 可以表示为

$$I_{ds} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_{th}) V_{ds}, \quad (11)$$

其中, μ_n 为电子的迁移率, C_{ox} 为单位面积的栅氧电容, V_{gs} 为栅源电压, V_{th} 为阈值电压, V_{ds} 为漏源电压. 跨导可以由上式推导出

$$g_m \equiv \left. \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} \right|_{V_{ds}} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} V_{ds}. \quad (12)$$

从 (12) 式可以看出, 决定 g_m 的最主要的参数是迁移率, 因此, 窄沟道器件的跨导的下降是由于迁移率退化造成的. 早期的研究表明, 辐照引起的 MOS 器件的迁移率退化主要是由于在栅氧和沟道区界面附近的界面态导致的, 而栅氧中的陷阱正电荷的影响可以忽略不计 [17]. 总剂量辐照对迁移率的影响由下式给出 [17]:

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{1}{1 + \alpha_{it} \Delta N_{it}}, \quad (13)$$

式中, μ 为辐照后载流子的有效迁移率, μ_0 为辐照前载流子的有效迁移率, α_{it} 是与界面态密度有关的经验常数, ΔN_{it} 是辐照引起的有效的界面态密度.

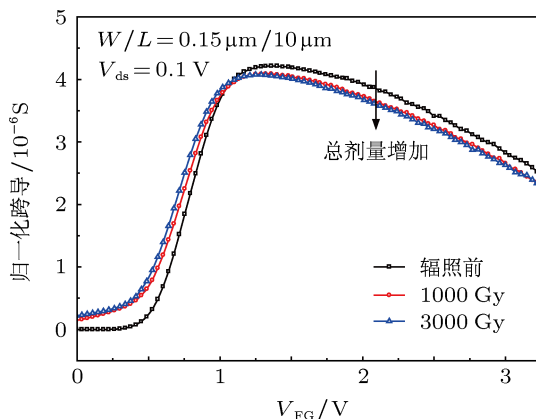


图3 在ON辐照偏置下,工作在线性区的窄沟道输入输出NMOS器件的归一化跨导(跨导/ μm 沟道宽度)随总剂量辐照的变化关系

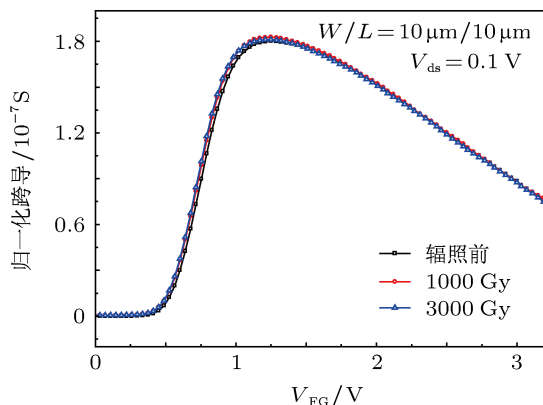


图4 在ON辐照偏置下,工作在线性区的宽沟道输入输出NMOS器件的归一化跨导(跨导/ μm 沟道宽度)随总剂量辐照的变化关系

在不同总剂量辐照下,宽沟道和窄沟道器件的归一化迁移率与栅源电压的关系根据(11)式提取出来,如图5所示.对于两种器件, μ/μ_0 都随栅压的增加而减小,这是因为栅极垂直电场的调制作用导致的.对于宽沟道器件,在相同的栅压下,总剂量增加, μ/μ_0 减小.这可能是因为总剂量越大,栅氧和沟道区界面附近产生的界面态越多.相比之下,窄沟道器件却表现出增强的载流子退化现象.我们认为,这是由于辐照产生的STI陷阱正电荷造成的.在窄沟道器件中,这些陷阱电荷很靠近沟道区域反型层中的电子,从而增加电子与电子之间的碰撞概率,缩短载流子的平均自由时间,根据下式给出的关系则有效迁移率下降:

$$\mu_n = \frac{q\tau_n}{m^*} \propto \frac{1}{P(C)}, \quad (14)$$

这里, τ_n 为电子在两次相邻碰撞之间的平均自由时间, m^* 为电子的有效质量, $P(C)$ 为电子与电子的碰撞概率.

从某种程度上来说,对于工作在线性区的窄沟道器件,辐照产生的STI陷阱正电荷会增加沟道区域的电子与电子间的碰撞概率,这类似于Rowlands等人提出的增强的表面粗糙度散射^[18].因此,STI导致的沟道区载流子迁移率退化的现象可以认为是另一种辐照增强的窄沟道效应.

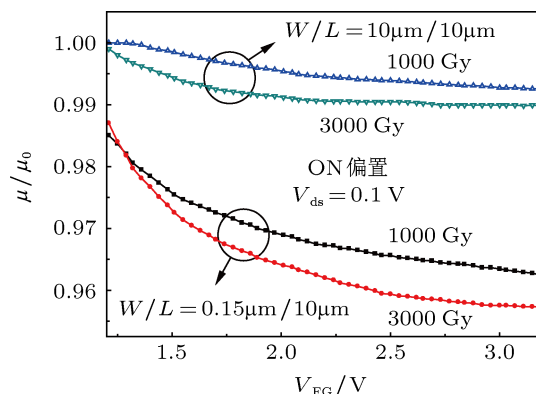


图5 在ON辐照偏置下,工作在线性区的宽沟道和窄沟道器件的归一化迁移率在不同总剂量辐照下与栅源电压之间的关系

3.3 三维器件仿真分析

我们用三维器件仿真来更好地理解窄沟道器件的总剂量辐照响应.模拟采用Silvaco TCAD仿真工具^[19].仿真模型包括Shockley-Read-Hall(SRH)模型和平行电场依赖(FLDMOB)模型等,分别用来模拟载流子的产生与复合过程以及速度饱和效应.器件网格结构通过工艺模拟获得,相关工艺参数由工艺厂商提供.图6给出了在三维器件仿真下,由于辐照后STI俘获电荷引起的阈值电压漂移(ΔV_{STI})随STI侧壁陷阱电荷密度的关系.我们假定辐照前STI侧壁的陷阱电荷密度为 $3 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-2}$,用不同的电荷密度 $5 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-2}$, $1 \times 10^{-12} \text{ cm}^{-2}$ 和 $1.6 \times 10^{-12} \text{ cm}^{-2}$ 分别模拟500 Gy, 1000 Gy和3000 Gy时STI侧壁产生的陷阱电荷密度.对于窄沟道器件,试验结果和模拟结果符合的很好.而对于宽沟道器件,STI侧壁陷阱电荷密度对阈值电压漂移的贡献可以忽略.

图7给出了工作在线性区($V_{ds} = 100 \text{ mV}$)的窄沟道器件辐照前后 I_{ds} - V_{FG} 特性曲线和归一化跨导的三维模拟仿真结果.其中,辐照后的仿真结果是通过在STI与体区界面处施加一定数量的等效电荷和增加沟道区载流子的表面粗糙度散射获得的.从图中可以看到,在亚阈值区,辐照后的归一化跨导略微增大,辐照后的 I_{ds} 也稍稍增加;在强反型区,

由于增加的载流子的表面粗糙度散射起主要作用, 导致归一化跨导降低, 所以这时 I_{ds} 没有明显增大, 甚至比辐照前 I_{ds} 小. 仿真结果和实验结果符合得很好.

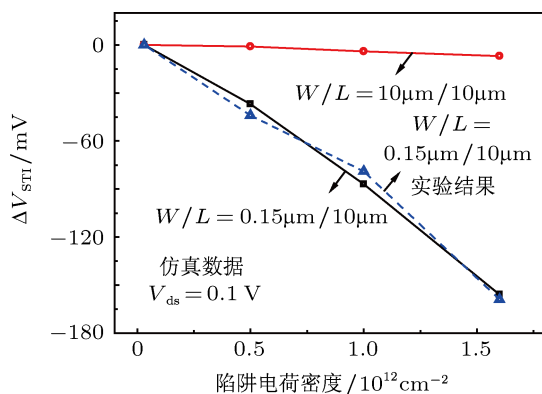


图6 在三维器件仿真下, 由于辐照后 STI 俘获电荷引起的阈值电压漂移随 STI 侧壁陷阱电荷密度的关系

4 结论

本文研究了总剂量辐照效应对 $0.13 \mu\text{m}$ 窄沟道 SOI NMOS 器件的影响. 总剂量辐照在 STI 中产生陷阱正电荷, 造成明显的窄沟道器件阈值电压漂移. 我们利用电荷守恒定律很好地解释了这一

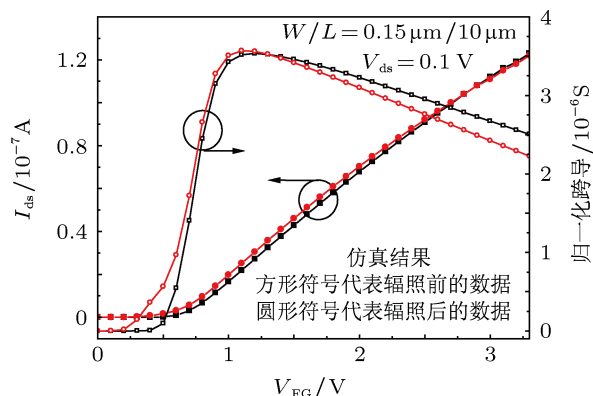


图7 窄沟道器件辐照前后 I_{ds} - V_{FG} 特性曲线和归一化跨导的三维模拟仿真结果

现象. 我们还首次报道了 STI 中的陷阱正电荷会引起工作在线性区的窄沟道器件的沟道区载流子迁移率退化, 从而导致跨导降低. 这是由于 STI 陷阱正电荷会增加载流子的表面粗糙度散射并通过三维器件仿真进行了验证, 仿真结果与实验结果符合得很好. 总而言之, 窄沟道器件的总剂量辐照效应要比宽沟道器件更为恶劣. 因此, 在辐照环境中, 应尽量避免使用窄沟道器件或采用特殊的加固手段来提高窄沟道器件的抗总剂量辐照的能力.

- [1] Huang R, Zhang G Y, Li Y X, Zhang X 2005 *SOI CMOS Technologies and applications* (Beijing: Publishing House of Science) p3 (in Chinese) [黄如, 张国艳, 张兴 2005 SOI CMOS 技术及其应用 (科学出版社) 第3页]
- [2] Zhou X J, Li L L, Zhou Y, Luo J, Yu Z G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 206102 (in Chinese) [周昕杰, 李蕾蕾, 周毅, 罗静, 于宗光 2012 物理学报 **61** 206102]
- [3] Liu S T, Anthony D, Heikkila W, Hughes H 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3475
- [4] Galloway K F, Wilson C L, Witte L C 1985 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **32** 4461
- [5] Hu Z Y, Liu Z L, Shao H, Zhang Z X, Ning B X, Chen M, Bi D W, Zou S C 2011 *Chin. Phys. B* **20** 120702
- [6] Liu Z L, Hu Z Y, Zhang Z X, Shao H, Ning B X, Bi D W, Chen M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 116103 (in Chinese) [刘张李, 胡志远, 张正选, 邵华, 宁冰旭, 毕大伟, 陈明 2011 物理学报 **60** 116103]
- [7] Hu Z Y, Liu Z L, Shao H, Zhang Z X, Ning B X, Bi D W, Chen M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 050702 (in Chinese) [胡志远, 刘张李, 邵华, 张正选, 宁冰旭, 毕大伟, 陈明 2012 物理学报 **61** 116103]
- [8] Barnaby H J, McClain M L, Esqueda I S 2008 *Proceedings of the 2008 IEEE Custom Integrated Circuits Conference* San Jose, USA, September 21–24, 2008 p273
- [9] Wu W M, Yao W, Gildenblat G 2008 *IEEE Trans. Elec. Dev.* **55** 3295
- [10] Schwank J R, Shaneyfelt M R, Dodd P E 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 2175
- [11] Ferlet-Cavrois V, Colladant T, Paillet P 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 1817
- [12] Mrstik B J, Hughes H L, McMarr P J 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 2189
- [13] Cavrois V F, Colladant T, Paillet P, Leray J L, Musseau O, Schwank J R, Shaneyfelt M R 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 2183
- [14] Zhuo Q Q, Liu H X, Yang Z N, Cai H M, Hao Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 220702 (in Chinese) [卓青青, 刘红侠, 杨兆年, 蔡惠民, 郝跃 2012 物理学报 **61** 220702]
- [15] Faccio F, Cervelli G 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2413
- [16] Saks N S, Ancona M G, Rendell R W 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 3219
- [17] Galloway K F, Gaitan M, Russell T J 1984 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **31** 1497
- [18] Rowlands D D, Dimitrijevic S 1991 *Microelectron Conf.* 1911 p130
- [19] ATLAS version 5.6.0.R, SILVACO

Effects of total ionizing dose on narrow-channel SOI NMOSFETs

Ning Bing-Xu^{1)2)†} Hu Zhi-Yuan¹⁾ Zhang Zheng-Xuan¹⁾ Bi Da-Wei¹⁾
Huang Hui-Xiang¹⁾²⁾ Dai Ruo-Fan¹⁾²⁾ Zhang Yan-Wei¹⁾²⁾ Zou Shi-Chang¹⁾

1) (*The State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

2) (*Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 10 October 2012; revised manuscript received 29 October 2012)

Abstract

The effects of total ionizing dose on narrow-channel N-type metal-oxide-semiconductor field-effect-transistors (NMOSFETs) in a 130 nm partially depleted silicon-on-insulator (SOI) technology are presented. The charge conservation principle is utilized to analyze the radiation-induced narrow-channel effect (RINCE). In addition, it is found for the first time, as far as we know that for the narrow-channel NMOSFETs operated in the linear region, the radiation-induced positive charges trapped in the shallow trench isolation can increase the probability of electron-electron collisions and surface roughness scattering, resulting in the degradation of the carrier mobility and transconductance of the main transistor. Finally, the RINCE as well as the degradation of the carrier mobility has been verified by our three-dimensional device simulation; and good agreement between the simulation and experimental results is obtained.

Keywords: total ionizing dose, shallow trench isolation, oxide trapped charge, narrow-channel NMOSFETs

PACS: 61.80.Ed, 73.50.Dn, 85.35.-p

DOI: 10.7498/aps.62.076104

† Corresponding author. E-mail: ningbx@mail.sim.ac.cn