

低剂量率 ^{60}Co γ 射线辐照下 SOI MOS 器件的退化机理*

商怀超[†] 刘红侠 卓青青

(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)

(2012年6月11日收到; 2012年7月12日收到修改稿)

本文通过实验分析了 $0.8\ \mu\text{m}$ 工艺 H 形栅 SOI MOS 器件在低剂量率下的 γ 射线总剂量效应. 实验结果表明, 总剂量相同时, 低剂量率的辐照效应更严重, 关态偏置条件下的阈值电压漂移大于开态, 辐照引起 NMOS 器件发生 kink 效应时的漏极电压 V_D 升高. 研究表明: 界面态对 PMOS 器件亚阈值斜率和跨导退化的影响作用不同, 主要原因是栅极偏置不同使起作用的界面态数量不同.

关键词: 低剂量率, 总剂量效应, kink 效应, 跨导

PACS: 61.80.Jh, 61.80.Ed, 24.50.+g

1 引言

SOI 技术实现了单个晶体管的全介质隔离, 从根本上消除了体硅 CMOS 器件的闩锁效应. 较小的电荷收集体积使 SOI 器件具有比体硅器件更好的抗单粒子效应及抗瞬时辐射的能力, 广泛应用于空间和其他辐照环境中. 然而绝缘埋层的存在使未经加固的 SOI 器件抗总剂量辐照的能力较弱. 在电离辐射的环境下, 辐射在绝缘埋层引入陷阱电荷和界面态. 近些年来, 国内外学者对 SOI 器件的总剂量辐射进行了深入研究^[1-3], 主要涉及总剂量辐照引起的 SOI 器件性能退化及其物理机理, 提出了分离氧化物陷阱和界面态的方法^[4]. 总剂量辐照在埋氧中俘获电荷, 引起阈值电压漂移; 在 Si/SiO₂ 界面引入界面态, 使跨导退化; 同时导致部分耗尽 (partially depleted, PD) 器件和全耗尽 (full depleted, FD) 器件源漏之间的漏电流增加, 器件因为过早开启而失效. 辐照效应与辐照过程中器件的偏置状态密切相关^[2,5], 在不同的辐照偏置下器件中的电场分布

不同, 在总剂量辐照中感生电荷的分布、数量也不尽相同.

空间环境中星载电子器件长期工作在辐射剂量率很低的环境中, 低剂量率辐照条件下, 器件的辐照效应与较高剂量率有着明显的不同. 国内外对于 H 形栅 SOI 器件的低剂量率辐射效应的研究相对较少. 本文通过低剂量率 γ 射线总剂量辐照实验与电学测试, 对 H 形栅结构的 PD SOI MOS 晶体管的总剂量辐照效应进行了研究, 探讨了低剂量率辐照效应对器件亚阈值特性、kink 效应和跨导等特性的影响.

2 辐照实验和测试

实验样品为 $0.8\ \mu\text{m}$ 工艺的带两个 p^+ 体引出端的 H 形栅结构 SOI 器件, 图 1 为 SOI 器件的版图结构, 有三种不同的器件尺寸, 宽长比 W/L 分别为 $8\ \mu\text{m}/8\ \mu\text{m}$, $8\ \mu\text{m}/1.6\ \mu\text{m}$, $8\ \mu\text{m}/0.8\ \mu\text{m}$; 栅氧化层厚度为 $17.5\ \text{nm}$, 埋氧层厚度为 $375\ \text{nm}$. 封装采用陶

* 国家自然科学基金 (批准号: 61076097, 60976068, 60936005), 教育部科技创新工程重大项目培育资金 (批准号: 708083) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 20110203110012) 资助的课题.

[†] E-mail: shc3287@126.com

瓷封装, 工作电压为 5 V.

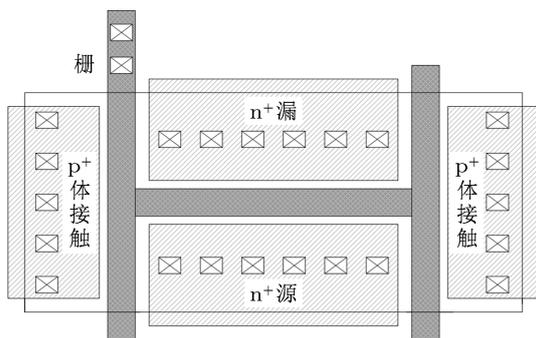


图1 H形栅 SOI 器件版图结构

电离辐照实验在西北核技术研究所的 ^{60}Co γ 射线源上进行, 剂量率为 1 rad(Si)/s, 总剂量分别为 36 krad(Si), 50 krad(Si), 100 krad(Si), 增加了一组剂量率为 50 rad(Si)/s, 总剂量 50 krad(Si) 和 100 krad(Si) 的实验作对比. 辐照过程中器件的电极偏置设置如表 1 所示, 其中 V_G, V_S, V_D, V_B

和 V_{SUB} 分别是栅极, 源极, 漏极, 体电极和衬底电极施加的电压.

3 实验结果分析

3.1 剂量率和偏置条件的影响

MOS 器件在总剂量辐照时, SiO_2 层中产生电子空穴对, 部分直接复合, 迁移率较大的电子在电场的作用下被扫出氧化层. 在这个过程中, 少量电子打断 Si-OH 键, 并被俘获, 释放出 H 原子. 空穴在向界面的移动过程中, 一部分会被陷阱中心或与氢有关的缺陷俘获, 形成正的氧化物陷阱电荷 [6], 导致阈值电压的负向漂移. SOI 材料在制备的过程中会在 Si/SiO₂ 界面处产生 Si-O, Si-Si 键或氧空位 [7], 未复合的空穴移动到界面后会断裂这些弱键, 在禁带中产生界面态, 界面态分为施主型和受主型, 引起阈值电压向不同方向漂移.

表 1 器件辐照时的偏置条件

辐照时器件偏置条件	V_G/V	V_S/V	V_D/V	V_B/V	V_{SUB}/V
开态	5	0	0	0	0
关态	0	0	5	0	0

图 2 为沟长 8 μm 的 NMOS 器件在关态偏置下, 剂量率为 1 rad(Si)/s 和 50 rad(Si)/s、总剂量为 50 krad(Si) 和 100 krad(Si) 的前栅转移特性曲线. 表 2 为两种剂量率下的阈值电压漂移和亚阈值斜率对比. 剂量率相同时, 总剂量大的阈值漂移

严重. 总剂量分别为 50 krad(Si) 和 100 krad(Si), 低剂量率 (1 rad/s(Si)) 的阈值电压漂移分别为 0.13 V 和 0.36 V, 大于高剂量率 (50 rad/s(Si)) 的 0.08 V 和 0.18 V. 辐照后亚阈值斜率略有减小, 关态漏电流很小.

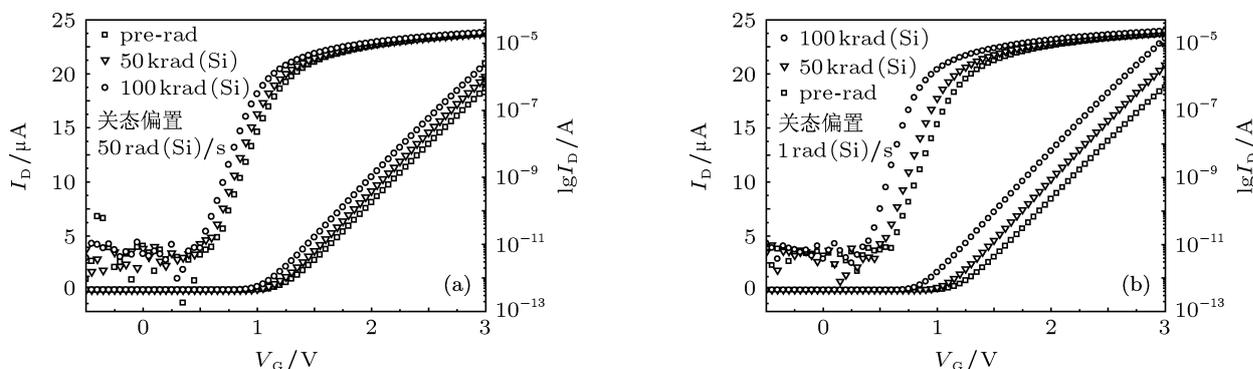


图 2 两种不同剂量率的 NMOS 前栅转移特性曲线 (a) 50 rad(Si)/s; (b) 1 rad(Si)/s

表 2 两种不同剂量率的阈值电压漂移和亚阈值斜率对比

剂量率	1 rad(Si)/s			50 rad(Si)/s		
	PreRad	50 krad(Si)	100 krad(Si)	PreRad	50 krad(Si)	100 krad(Si)
$\Delta V_T/V$	0	-0.13	-0.36	0	-0.08	-0.18
$S/(mV/dec)$	106.39	99.53	91.35	104.05	102.89	99.05

电离辐射在栅氧化层中产生电子空穴对, 部分未复合变成自由电子和空穴. 电子迁移率较大很快被电极收集, 在氧化层内留下的空穴 (包括自由空穴和被陷阱所俘获的空穴) 会形成电场, 类似于带正电的导体, 电场使氧化层上下表面的空穴加速穿出氧化层, 减少了空穴在 SiO_2/Si 界面被陷阱俘获的概率. 对关态偏置的两种不同剂量率, 总剂量相同时, 剂量率大的辐照时间短, 形成的氧化层电场强, 被陷阱俘获电荷和生成的界面态大大减少, 相同剂量下低剂量率的辐射效应更严重.

图 3 为不同偏置条件下 NMOS 器件和 PMOS 器件的阈值电压漂移曲线, 关态偏置的阈值电压漂移大于开态. 对于 NMOS 器件, 开态偏置形成的电场一方面促使自由电子被栅电极收集, 同时加速空穴向 SiO_2/Si 界面移动, 促进了空穴穿过界面进入体区, 影响自身的继续积累, 使空穴被界面态和陷阱俘获的概率大大减小. 越过界面进入体区的空穴在 Si 中的迁移率远大于在 SiO_2 中的迁移率, 在电场的作用下很快远离界面或复合掉. PMOS 器件与 NMOS 的不同之处在于电场会使产生的电子对向体区移动, 阻碍空穴到达 SiO_2/Si 界面. 但是开态偏置的阈值电压的漂移仍然小于关态, 说明偏置对 PMOS 电子空穴对分离的影响小于偏置形成的电场阻碍空穴向 SiO_2/Si 界面移动的影响.

3.2 辐照对 NMOS 器件 kink 效应的影响

图 4 为器件工作在强反型区 ($V_G = 3 \text{ V}$) 的输出特性曲线. 辐照时采用体接触 ($V_B = 0$), 测量时采用体接触 (对应图中粗线) 和体浮空 (对应图中细线) 两种偏置方式. 对于体接触, 没有发生 kink 效应, 说明体接触的存在减少了空穴在体区的积累, 防止了体电势的提高, 抑制了 kink 效应. 对体浮空, 辐照后出现 kink 效应, 随着辐照剂量的增加, 发生 kink 效应对应的 V_D 由辐照之前的 3.6 V 增加到 50 krad(Si) 的 4.2 V , 辐照剂量为 100 krad(Si) , 扫

描电压到 5 V 时甚至没有出现 kink 效应. 这是由于电离辐射在栅氧化层中俘获空穴提高了栅极电压, 使沟道处电势升高, 降低了沟道电子在漏端场区加速获得能量, 减少了电子在漏极附近的碰撞电离. 此时, 只有提高 V_D 才能使沟道电子获得足够的能量发生碰撞电离. 因此, 辐照后的器件更难发生 kink 效应.

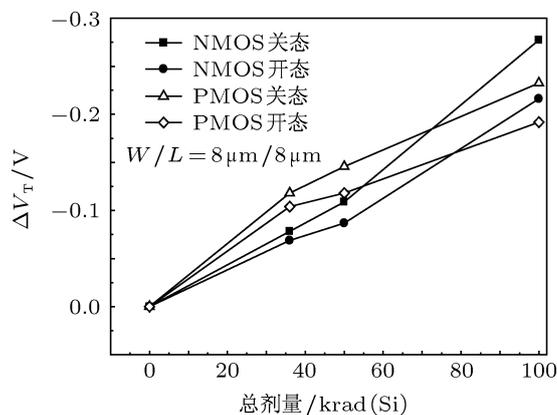


图 3 不同偏置条件下 NMOS 器件和 PMOS 器件阈值电压漂移曲线

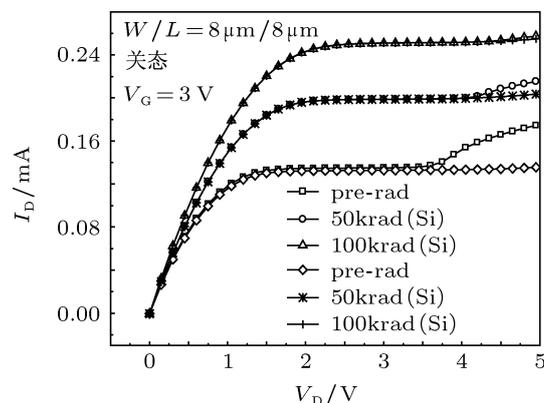


图 4 沟道长度为 $8 \mu\text{m}$ 器件 $V_G = 3 \text{ V}$ 的输出特性曲线

图 5 给出了不同沟道长度器件 $V_G = 1 \text{ V}$ 时的输出曲线, 粗线和细线分别为体接触和体浮空偏置. $V_G = 1 \text{ V}$ 的长沟道器件输出特性曲线, 如

图 5(a) 所示. 辐照前, 器件处于截止状态. 辐照剂量为 100 krad(Si) 引起阈值电压漂移导致器件开启, 出现了明显的漏极电流. 随着漏极电压升高, 体接触器件电流变化不大, 体浮空器件的输出曲线在 3.8 V 出现上翘. 由图 4 可知, 随栅压升高, 强

反型区辐照后发生 kink 效应的 V_D 增大. 但图 5(a) 中, 辐照前后上翘的 V_D 基本不变. 沟道弱反型, 电子浓度较低, 虽然辐照引起阈值电压的漂移, 但沟道电子浓度较小, 对碰撞电离产生的空穴的积累贡献较小, 漏极电流 I_D 很小, 仅 μA 数量级.

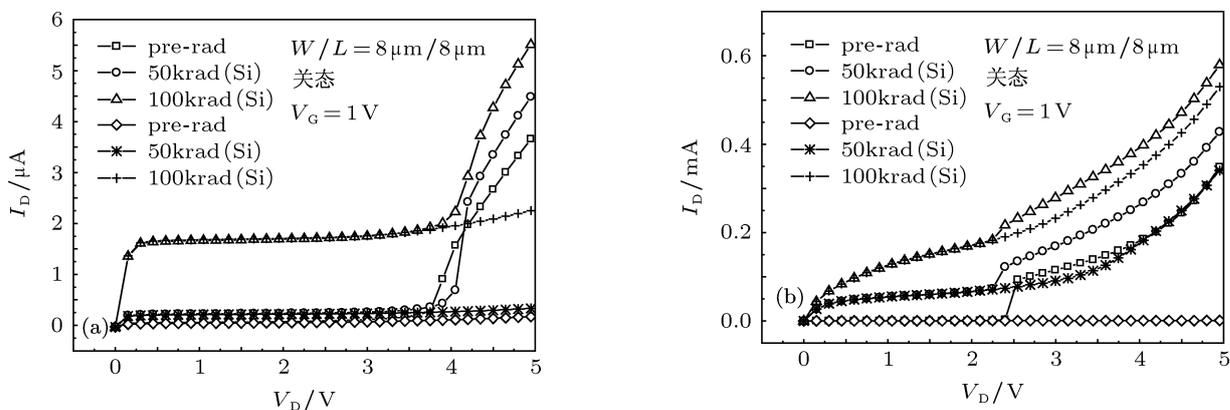


图 5 两种不同沟长器件在 $V_G = 1\text{ V}$ 时的输出曲线 (a) $L = 8\ \mu\text{m}$; (b) $L = 0.8\ \mu\text{m}$

对于 $V_G = 1\text{ V}$ 的短沟道器件, 如图 5(b) 所示. 当 V_D 小于 2.3 V 时, 体接触和体浮空的两组曲线几乎是重合的, 辐照剂量为 100 krad(Si) 器件的输出电流缓慢上升. 在 2.3 V 左右, 体浮空器件的电流比体接触器件有上翘. 但是随着漏极电压的升高, 上翘的幅度并没有变大, 体接触与体浮空漏极电流的差值几乎保持不变, 说明体接触对辐照后短沟道器件的 kink 效应的抑制能力较差.

3.3 界面态对 PMOS 亚阈值斜率和跨导的影响

对于 PD SOI 器件, 考虑界面态的影响, 界面陷阱对应的电容 C_{it} 与耗尽区电容并联, 可以推出亚阈值斜率 [8]

$$S = \frac{kT}{q} \ln(10) \left(1 + \frac{C_D + C_{it}}{C_{ox}} \right), \quad (1)$$

其中 C_D 和 C_{it} 分别为耗尽区电容和界面陷阱对应的电容. 表 3 给出了 PMOS 不同偏置条件和辐照剂量下的亚阈值斜率. 由表 3 中的数据, 亚阈值斜率在辐照后略有增加, 说明界面态对器件的亚阈值斜率影响较小.

图 6 给出了开态偏置和关态偏置下, 沟道长度为 $8\ \mu\text{m}$ 辐照后跨导随着总剂量的变化曲线. 两组曲线的变化趋势相同, 曲线整体发生偏移, 最大跨导降低. 最大跨导位置的变化是由阈值电压漂移引起的, 氧化物陷阱电荷起主要作用. 最大跨导降低主要是由界面态对沟道载流子的散射引起的. 在关态偏置下, 跨导退化严重, 退化量超过了 41%. 对开态偏置, 退化量只有 11%. 说明关态偏置产生的界面态明显多于开态. 界面态对沟道载流子的散射导致迁移率下降, 跨导降低.

表 3 PMOS 不同偏置条件和辐照剂量下的亚阈值斜率 $S/(\text{mV}/\text{dec})$

总剂量/krad(Si)	0	36	50	100
关态	-70.09639	-70.35525	-71.48893	-72.10122
开态	-72.29253	-73.7980918	-73.56742	-73.94671

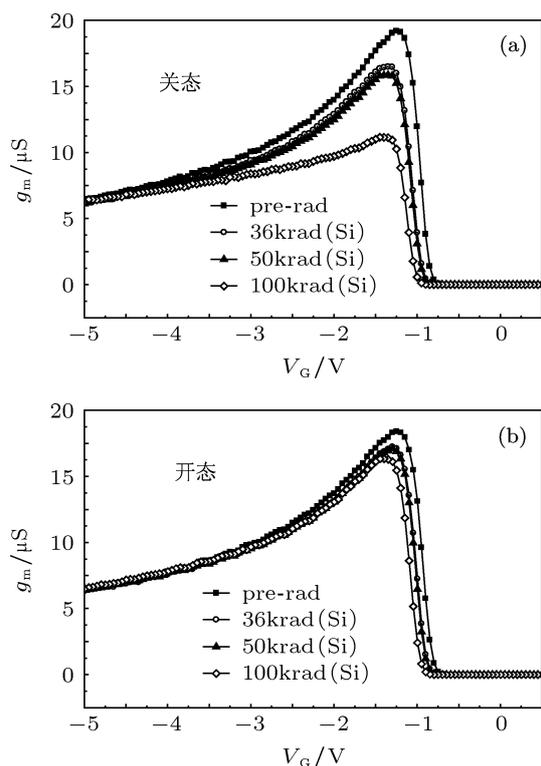


图6 跨导随着总剂量的变化曲线 (a) 开态偏置; (b) 关态偏置

由 Saks 的 H^+ 模型^[9], 辐照产生的电子空穴对与氢化物作用形成中性原子 H^0 , H^0 俘获空穴变成 H^+ ; H^+ 漂向界面发生如下反应:

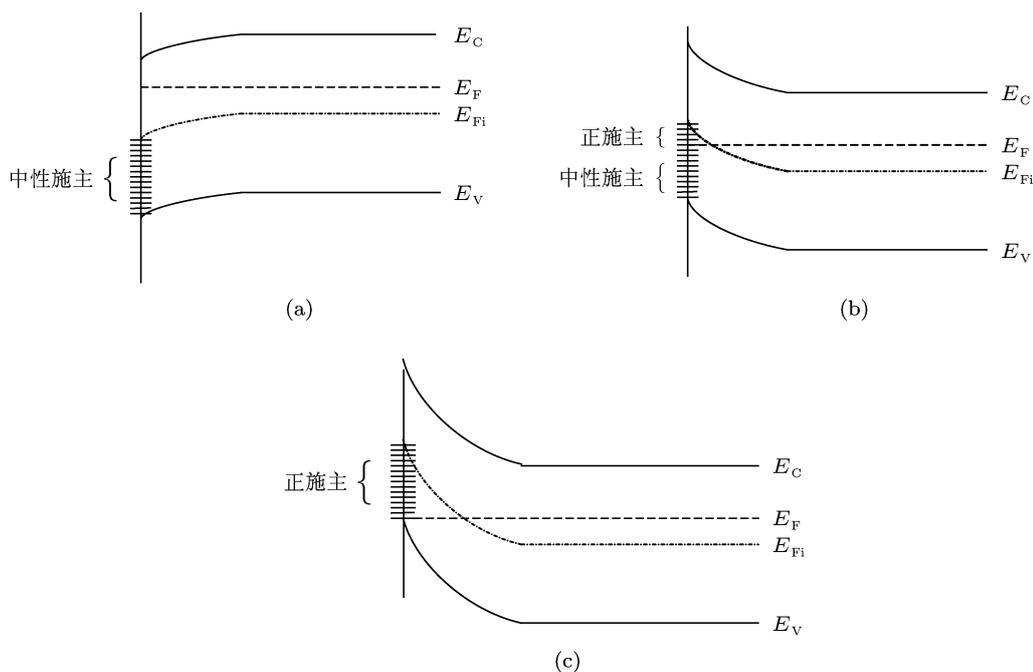
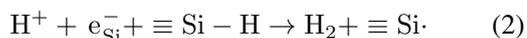


图7 界面陷阱电荷在不同偏置时的能带图 (a) 积累; (b) 弱反型; (c) 强反型

负栅压在栅氧化层内形成的电场会阻碍空穴穿过氧化层到达 SiO_2/Si 界面, 减少了空穴被中性 H^0 原子俘获形成 H^+ 离子的概率, 降低了界面态的生成. H^+ 离子在氧化层内的转移是一个缓慢的过程, 这也是缓发界面态建立时间很长的原因. 而氧化层内电场的存在进一步减慢了这个过程. 因此, 对 PMOS 器件, 开态偏置形成的界面态比关态偏置少很多. 界面态电荷增量对迁移率的影响可表示为

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + a\delta Q_{IT}}, \quad (3)$$

界面陷阱对沟道电子的散射引起迁移率和跨导的严重退化.

对比界面态和跨导退化的影响可以发现, 界面态对 PMOS 亚阈值斜率的影响较小, 对跨导的影响较大. 这是由于在亚阈值区和跨导退化区域起作用的界面陷阱电荷不同引起的. 对于 PMOS 器件, 界面态主要呈现正电性, 为施主型界面态, 陷阱能级靠近价带. 当其位于费米能级以下时呈中性荷电状态, 位于费米能级以上时释放出电子呈正的荷电状态. 偏置条件可以引起半导体功函数的改变. PMOS 器件沟道为 n 型材料, 费米能级靠近导带, 在积累和弱反型区 (亚阈值区), 绝大多数界面陷阱能级位于费米能级以下, 界面陷阱呈现电中性, Q_{IT} 较小,

对亚阈值斜率的影响较小. 在强反型区, 半导体功函数变大, 费米能级下降, 当其低于绝大多数界面态能级时, 界面态释放电子呈现正电性, 能带结构如图 7 所示. 由于跨导严重退化区域位于强反型区, 此时的界面陷阱电荷具有最大值, 迁移率退化较大. 因此, 偏置条件引起费米能级变化, 起作用的界面陷阱电荷数量不同, 是导致界面态对亚阈值斜率和跨导影响作用不同的主要原因.

4 结论

通过对剂量率为 1 rad(Si)/s 下 ^{60}Co γ 射线的辐照之后 0.8 μm SOI 器件的总剂量辐照特性的分

析, 可以得到如下结论:

1. 总剂量相同时, 低剂量率的辐照效应严重, 对于开态和关态两种偏置, 关态偏置阈值电压漂移大于开态.

2. 体接触结构可以抑制 NMOS 器件的 kink 效应. 辐照后发生 kink 效应时的漏极电压增大. 在沟道宽度不变的情况下, 随着沟道长度的减小, 体接触对短沟道器件辐照后 kink 效应的抑制减弱.

3. 界面态影响对 PMOS 器件亚阈值斜率的影响小于对跨导的影响, 主要是由于栅电压不同导致了起作用的界面陷阱电荷数量不同. 关态偏置形成的界面态多, 跨导退化大于开态.

-
- [1] Schwank J R, Ferlet-Cavrois V, Shaneyfelt M R, Fleetwood D M, Paillet P, Dodd P E 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 522
- [2] Adell P C, Barnaby H J, Schrimpf R D, Vermeir B 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 2174
- [3] Liu Z L, Hu Z X, Zhang Z X, Shao H, Ning B X, Bi D W, Chen M, Zou S C 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 116013 (in Chinese) [刘张李, 胡志远, 张正选, 邵华, 宁冰旭, 毕大炜, 陈明, 邹世昌 2011 物理学报 **60** 116013]
- [4] Jun B, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Zhou X, Montes E J, Cristoloveanu S 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1891
- [5] Flament O, Torres A, Ferlet-Cavrois V 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 2316
- [6] Schwank J R, Shaneyfelt M R, Fleetwood D M, Felix J A, Dodd P E, Paillet P, V Ferlet-Cavrois V 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 1842
- [7] Torres A, Flament O 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 1462
- [8] Huang R, Zhang G Y, Li Y X, Zhang X 2005 *SOI CMOS Technology and Its Application* (Beijing: Science Press) p179 (in Chinese) [黄如, 张国艳, 李映雪, 张兴 2005 *SOI CMOS 技术及其应用* (北京: 科学出版社) 第 179 页]
- [9] Saks N S, Klein R B, Griscom D L 1988 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **35** 1234

Degradation mechanism of SOI NMOS devices exposed to ^{60}Co γ -ray at low dose rate*

Shang Huai-Chao[†] Liu Hong-Xia Zhuo Qing-Qing

(Key Laboratory of Ministry of Education for Wide Band-Gap Semiconductor Material and Devices, School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 30 June 2012; revised manuscript received 12 July 2012)

Abstract

The total dose effect of 0.8 μm SOI NMOS device with H-gate is analyzed. The device is exposed to ^{60}Co γ -ray at low dose rate. The result shows that the irradiation effect is more serious at low dose rate for the same total irradiation dose. The threshold voltage shift in on state is lower than in off state. Irradiation leads to the increased drain voltage V_D of kink effect. Because the number of effective interface traps varies with gate bias, interface trap has different influences on sub-threshold slope and transconductance.

Keywords: low dose rate, total dose effect, kink effect, transconductance

PACS: 61.80.Jh, 61.80.Ed, 24.50.+g

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61076097, 60976068, 60936005), Cultivation Fund of the Key Scientific and Technical Innovation Project, Ministry of Education of China Program (Grant No. 708083), and the Central university basic research and operating expenses of special funding (Grant No. 20110203110012).

[†] E-mail: shc3287@126.com