

p 型金属氧化物半导体场效应晶体管低剂量率辐射损伤增强效应模型研究

高博¹⁾²⁾³⁾ 余学峰^{1)3)†} 任迪远¹⁾³⁾ 崔江维¹⁾²⁾³⁾ 兰博¹⁾²⁾³⁾ 李明¹⁾²⁾³⁾ 王义元¹⁾²⁾³⁾

1)(中国科学院新疆理化技术研究所,乌鲁木齐 830011)

2)(中国科学院研究生院,北京 100049)

3)(新疆电子信息材料与器件重点实验室,乌鲁木齐 830011)

(2010年7月14日收到;2010年9月9日收到修改稿)

对一种非加固 4007 电路中 p 型金属氧化物半导体场效应晶体管 (PMOSFET) 在不同剂量率条件下的电离辐射损伤效应及高剂量率辐照后的退火效应进行了研究. 通过测量不同剂量率条件下 PMOSFET 的亚阈 $I-V$ 特性曲线, 得到阈值电压漂移量随累积剂量、退火时间的变化关系. 实验发现, 此种型号的 PMOSFET 具有低剂量率辐射损伤增强效应. 通过描述 H^+ 在氧化层中的输运过程, 解释了界面态的形成原因, 初步探讨了非加固 4007 电路中 PMOSFET 低剂量率辐射损伤增强效应模型.

关键词: p 型金属氧化物半导体场效应晶体管, ^{60}Co γ 射线, 电离辐射损伤, 低剂量率辐射损伤增强效应

PACS: 61. 82. Fk, 61. 80. Ed, 85. 30. Tv, 98. 70. Rz

1. 引言

空间电离辐射环境会对航空航天电子系统构成威胁, 严重时可能降低系统的可靠性, 导致卫星、航天器的失效. 因此, 对空间辐射环境进行探测, 对卫星、航天器的抗辐射设计、保证空间电子系统的正常工作具有重要的指导意义.

p 型金属氧化物半导体 (p-type metal-oxide-semiconductor, 简记为 PMOS) 剂量计是基于金属/绝缘体/半导体结构的电荷剂量测量技术发展起来的, 其基本原理是利用阈值电压漂移作为辐照总剂量的敏感参数^[1]. PMOS 剂量计具有实时监测、低能耗、近似点测的功能; 同时 PMOS 剂量计还具有多点监测的功能, 可以同时对其上关键电子元器件、系统的吸收剂量进行准确的实时监测. 这些特点使得 PMOS 剂量计自 20 世纪 80 年代以来被广泛地应用在美国、欧洲、加拿大等国的卫星和空间站^[2]. 国内也有卫星搭载了 PMOS 剂量计, 完成对卫星内部总剂量辐射环境的监测^[2].

目前, 理论认为金属氧化物半导体 (MOS) 器件

的剂量率效应是一种时间相关性效应, 通过与低剂量率辐照等时的室温退火可以消除高低剂量率辐射损伤之间的差异. 但在 2003 年, Kim 等发现 p 型金属氧化物半导体场效应晶体管 (p-type metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, 简记为 PMOSFET) 存在类似于双极器件的低剂量率辐射损伤增强效应 (enhanced low dose rate sensitivity, 简记为 ELDRS), 即辐照到相同剂量时, 低剂量率下的辐射响应要大于高剂量率, 并且响应的差异不能通过室温退火消除^[3-6]. 作为 PMOS 剂量计的探头, PMOSFET 一旦具有低剂量率辐射损伤增强效应, 将严重影响剂量计标定的准确性, 进而对卫星、航天器的可靠性产生不可估计的影响. 因此, 深入研究 PMOSFET 的剂量率效应, 了解它的产生机理, 对于在空间中更好的使用 PMOS 剂量计具有十分重要的指导意义^[1].

通过大量实验发现, 一种非加固 4007 电路中的 PMOSFET 具有 ELDRS 效应. 我们从氧化物陷阱电荷和界面态陷阱电荷的形成出发, 分析了氧化物陷阱电荷与界面态陷阱电荷对阈值电压漂移产生的影响, 认为此种型号 PMOSFET 产生 ELDRS 效应主

† 通讯联系人. E-mail: yuxf@ms. xjb. ac. cn

要是由于低剂量率辐照时生成的界面态陷阱电荷引起的. 同时,通过描述 H^+ 在氧化层的输运过程,解释了界面态的形成原因,初步探讨了非加固 4007 电路中 PMOSFET 低剂量率辐射损伤增强效应模型.

2. 实验方法

实验样品采用国外某厂家生产的商用 4007 器件. 器件是由两对 PMOS 管、两对 n 型金属氧化物半导体 (n-type metal-oxide-semiconductor, 简记为 NMOS) 管和一个互补金属氧化物半导体 (complementary metal-oxide-semiconductor, 简记为 CMOS) 反相器构成. 辐照时,器件的两对 n 管和 p 管的漏极相连,接成倒相器形式;p 管源极接 +10V, n 管源极接地,栅极接 +10V 偏压.

电离辐照实验是在我所 2.6×10^{16} Bq 和 3.7×10^{13} Bq 的 ^{60}Co γ 射线辐照源上进行,辐照累积剂量 1 kGy(Si). 利用 FeSO_4 热释光剂量片对剂量率进行标定,辐照剂量率 (Si) 分别为 5×10^{-1} , 1.8×10^{-3} , 2×10^{-4} Gy/s. 当样品辐照到一定剂量时,进行移位测试,测试参数主要是亚阈 $I-V$ 特性曲线,测试在 30 min 内完成. 对高剂量率 (5×10^{-1} , 1.8×10^{-3} Gy/s (Si)) 辐照结束后进行室温退火实验,退火时间加上辐照时间与低剂量率辐照到相同剂量时所需时间相同,退火与辐照时器件的偏置条件相同, $V_i = V_{DD} = 10$ V, $V_{SS} = 0$ V.

3. 实验结果

图 1 示出了不同剂量率条件下 4007 电路中

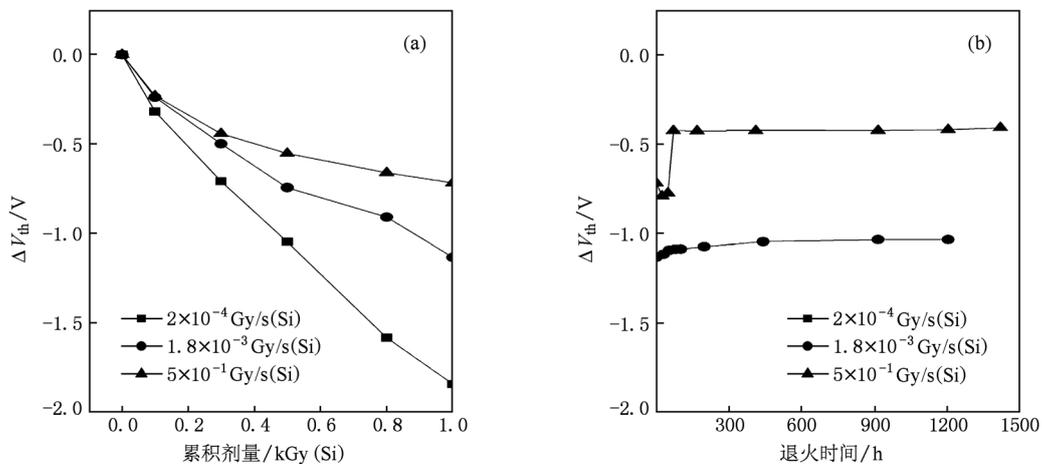


图 1 4007 电路中 PMOSFET 阈值电压的漂移量随累积剂量(a)和退火时间(b)的变化关系

PMOSFET 阈值电压的漂移量 ΔV_{th} 随累积剂量、退火时间的变化关系. 从图 1 可见,随着累积剂量的增加,PMOSFET 阈值电压的漂移量发生负向漂移,并且累积剂量越大,阈值电压漂移越明显. 辐照到相同剂量时,低剂量率辐照下阈值电压的漂移量最大. 高剂量率辐照后室温退火期间, PMOSFET 的阈值电压出现了不同程度的回漂. 我们认为此种型号 PMOSFET 具有 ELDRS 效应,也就是辐照到相同剂量时,低剂量率辐射损伤比高剂量率辐射损伤更为显著,并且这种损伤的差异不能通过与低剂量率辐照时间相同的室温退火加以消除.

电离辐射引起 PMOSFET 阈值电压的漂移主要是由辐射感生的氧化物陷阱电荷和界面态陷阱电荷共同作用的结果^[7, 8],即

$$\Delta V_{th} = \Delta V_{ot} + \Delta V_{it}, \quad (1)$$

其中 ΔV_{ot} 是氧化物陷阱电荷引起阈值电压的漂移量; ΔV_{it} 是界面态陷阱电荷引起阈值电压的漂移量. 实验中我们利用亚阈电荷分离法^[9] 将阈值电压的漂移分离成 ΔV_{ot} 和 ΔV_{it} .

图 2 和图 3 分别是 4007 电路中 PMOSFET 在不同剂量率条件下辐射感生的氧化物陷阱电荷和界面态陷阱电荷引起阈值电压的漂移量随累积剂量、退火时间的变化关系. 从图 2 可以看到,氧化物陷阱电荷引起阈值电压的漂移量随累积剂量的增加而负向增大,低剂量率辐照时引起阈值电压的漂移量与高剂量率相差不大. 辐照后,高剂量率辐照时产生氧化物陷阱电荷导致阈值电压的漂移量随退火时间的增加而缓慢减小. 同时,从图 3 看到界面态陷阱电荷也引起了阈值电压的负向漂移. 低剂量率辐照时,辐射感生界面态陷阱电荷引起阈值电压

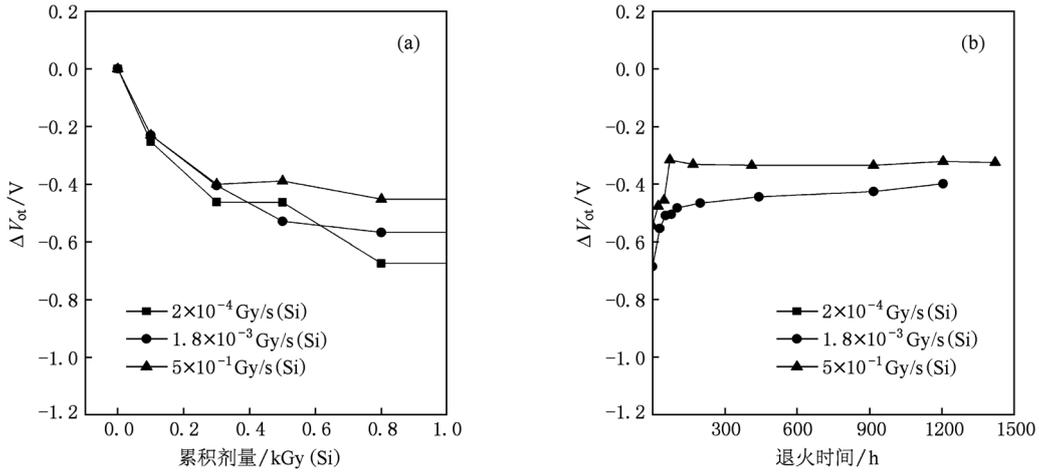


图2 4007 电路中 PMOSFET 的 ΔV_{th} 随累积剂量 (a) 和退火时间 (b) 的变化关系

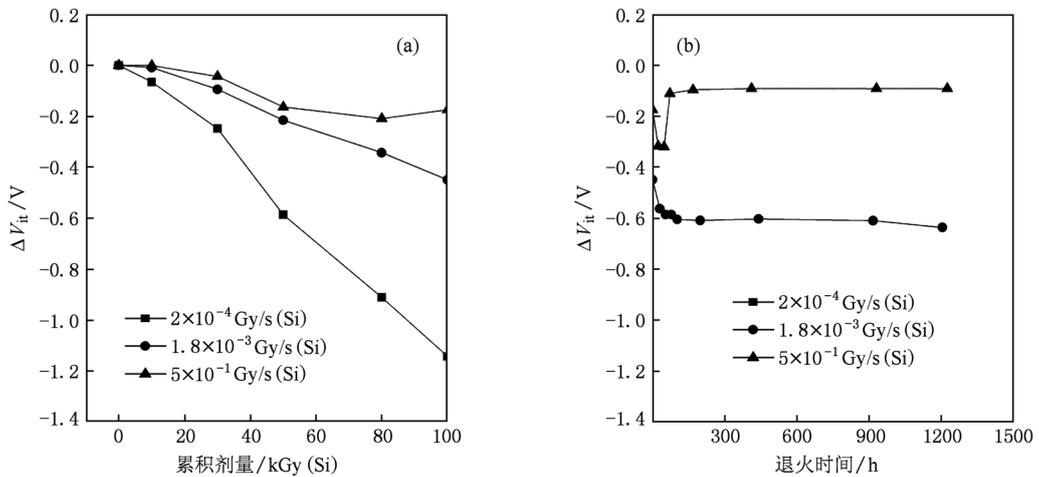


图3 4007 电路中 PMOSFET 的 ΔV_{th} 随累积剂量 (a) 和退火时间 (b) 的变化关系

的漂移量远大于高剂量率时的值.

4. 结果讨论

当辐照到相同剂量时,高剂量率下氧化物陷阱电荷引起阈值电压的漂移量和低剂量率下的值相差不大(图2).从文献[10]可知,高剂量率辐照时,短时间内产生大量的电子-空穴对,电子在电场的作用下漂移出栅氧化层,而空穴被俘获生成氧化物陷阱电荷,生成氧化物陷阱电荷的同时伴随着陷阱电荷由于隧道效应发生的退火.同时,随着时间的推移,栅氧化层中的空穴陷阱被空穴填充趋于饱和造成辐射感生电子-空穴对的复合概率增大,被俘获的空穴越来越少^[10].因此,我们看到高剂量率下氧化

物陷阱电荷引起阈值电压的漂移量和低剂量率下的值相差不大.

从图3中看到,剂量率不同界面态陷阱电荷引起阈值电压的漂移量相差很大.高剂量率辐照和退火后界面态陷阱电荷引起阈值电压的漂移量远小于低剂量率辐照到相同剂量时的值.由此我们初步认为,PMOSFET中出现ELDRS效应是由于界面态陷阱电荷数量上的差异引起的.界面陷阱电荷密度 N_{pb} 的动力学方程为^[7, 11-16]

$$\frac{\partial N_{pb}}{\partial t} = (N_{SiH} - N_{pb})\sigma_{it}f_H(L - a) - N_{pb}/\tau_{pb}, \quad (2)$$

其中 L 是栅氧层的厚度, σ_{it} 是Si-H键对质子的俘获截面, f_H 是通过界面的质子流, N_{SiH} 和 N_{pb} 是Si-H键密度和界面陷阱电荷密度, τ_{pb} 是界面陷阱电荷的

退火时间, a 是界面附近俘获空穴的距离, 如图 4 所示. (2) 式中假定在 Si—SiO₂ 界面处 H⁺ 没有与来自 Si 衬底的电子中和, 而是直接与 Si—H 键反应. 在界面附近总的电荷密度 p ($p = p_i + N_{pb}$, p_i 是界面附近俘获空穴产生的电荷密度) 是由俘获空穴和 H⁺ 产生的, 当 p 接近 $p_m \times L^2/a^2$ (p_m 是接近金属界面处的电荷密度), 界面区域左边缘的电场 $E(L - a)$ 和到达界面左边区域的所有带电粒子的通量下降到零, 如图 4 所示. 因此, 得出稳态的界面态表达式^[16]

$$N_{pb} = \frac{qu_p \tau_{pb} N_{DH} \sigma_{\text{H}} L^2 p}{8 \epsilon_r \epsilon_0 a} \left(1 - \frac{a^2}{L^2} \frac{\chi p}{\frac{1}{\tau_i} + \chi \frac{a^2}{L^2} p} \right)^2, \quad (3)$$

其中, N_{DH} 是氧化层体内含氢的缺陷浓度, σ_{H} 是质子逃离缺陷的横截面, $\chi = N_i qu_p L \sigma_{\text{H}} / (\epsilon_r \epsilon_0)$. 从 (3) 式中我们得到, 高剂量率辐照时短时间内产生了大量的氧化物陷阱电荷, 使得界面附近的电场 $E(L - a)$ 减小到零, 阻止 H⁺ 到达界面处与缺陷相互作用形成界面态. 在这种情况下, 由于氧化层中的电场指向栅, 产生的 H⁺ 远离界面, 形成界面态的数量很少. 另一方面, 低剂量率辐照时, 由于产生的氧化物陷阱电荷速度很慢, 使得大量的 H⁺ 输运到界面附近, 与缺陷相互作用, 形成界面态. 因此, 低剂量率辐照时形成界面态的数量远多于高剂量率.

我们用 H⁺ 在氧化层的输运来解释界面态的形成过程. 电离辐射在 MOS 器件的氧化层中沉积能量, 使其中的原子键断裂产生大量的电子-空穴对, 在外加电场作用下, 由于电子的迁移率较大, 逃离初始复合的电子很快漂移出氧化层, 而空穴迁移率较小, 一部分空穴被氧化层中的缺陷俘获形成氧化物陷阱电荷, 一部分空穴与 DH (如 Si—H, Si—H—Si, Si—O—Si) 相互作用释放出 H⁺, H⁺ 缓慢漂移到 Si—SiO₂ 处, 被界面缺陷俘获形成界面态陷阱电

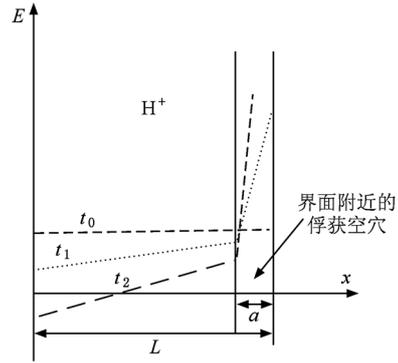
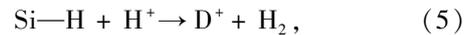


图 4 氧化层中电场分布^[16] t_0 是辐照前氧化层中电场分布, t_1 是低剂量率辐照时产生的陷阱电荷引起氧化层中电场的变化, t_2 是高剂量率辐照时产生的陷阱电荷引起氧化层中电场的变化

荷^[9, 11]. 我们知道^[11], SiO₂ 中空穴的迁移率比 H⁺ 的迁移率高 4—6 个数量级, 因此, 辐照产生的空穴先于 H⁺ 输运到界面, 被俘获形成氧化物陷阱电荷. 低剂量率辐照时, H⁺ 有足够的时间输运到 Si—SiO₂ 界面, 与 Si—H 反应生成界面态. 这就导致了低剂量率辐照时辐射感生的界面态陷阱电荷远多于高剂量率时的值. 辐照在氧化层内产生的空穴与 DH 反应, 生成 H⁺ 和 D 的反应方程式如下^[11, 15, 16]:



生成的 H⁺ 输运到 Si—SiO₂ 界面, 与 Si—H 键反应生成 H₂ 和 D⁺, 即^[15]



其中 D⁺ 是界面态. H⁺ 在界面处与 Si—H 键反应生成 H₂ 和 D⁺ 如图 5 所示.

H⁺ 在 SiO₂ 输运过程中需要 0.4—0.8 eV 的激活能, 水平输运到界面需要 0.3 eV 的激活能, H⁺ 通过 Si—SiO₂ 界面进入 Si 衬底需要 1 eV 的激活能^[12, 13]. 高剂量率时, 氧化物陷阱电荷形成内电场, H⁺ 获得跃迁所需激活能的概率减小, 使得 H⁺

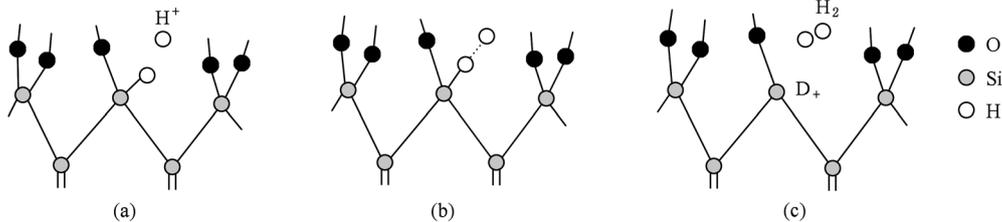


图 5 H⁺ 与界面处 Si—H 键反应生成 H₂ 和 D⁺ ^[14] (a) H⁺ 靠近 Si—H 键中 H 原子; (b) H⁺ 与 Si—H 键之间“桥梁”的产生; (c) H₂ 分子和带正电的缺陷 D⁺ 形成

运输到界面处产生界面态的概率变小. 因此,高剂量率辐照时产生界面态的数量很少. 同时,生成界面态不与氢相互作用,它只和来自 Si 衬底的电子交换电荷. 从 Si 一侧隧穿来的电子被俘获同时中和悬挂键的概率与界面处的电场有关. 高剂量率时,由于氧化物陷阱电荷形成电场,导致电子隧穿的概率增大,使得有限的界面态被中和,引起界面态的数量减小.

如图 6 所示,高剂量率辐照时^[11, 16, 17],短时间内产生了大量的电子-空穴对,空穴的迁移率比 H^+

高,运输到界面处被陷阱俘获,形成了大量的氧化物陷阱电荷,氧化物陷阱电荷在界面处形成电场,这个电场阻碍了其他迁移离子(空穴和 H^+)向界面处的运输. 电场形成的强度与剂量率、 H^+ 迁移率、空穴迁移率有关. 相对于空穴迁移率, H^+ 的迁移率较低,假如剂量率很高并且总剂量足够大以至于产生足够大的电场,这时界面态的形成就可以忽略. 同时,内电场的存在使得 H^+ 获得激活能跃迁的概率减小. 因此,高剂量辐照时产生的氧化物陷阱电荷远多于界面态陷阱电荷.

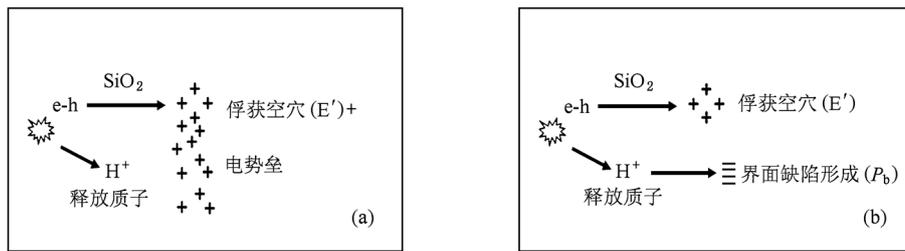


图 6 不同剂量率辐照时形成的内电场 (a) 高剂量率辐照; (b) 低剂量率辐照^[11, 17]

低剂量率辐照时^[11, 16, 17],电子-空穴对的产生速率很低,氧化物陷阱电荷累积的速度很慢,形成的内电场很弱,对 H^+ 运输的阻碍作用很小, H^+ 有足够的时间和能力运输到 Si—SiO₂ 界面,与 Si—H 键发生反应生成界面态(在这种情况下, H^+ 既参与电场的建立又参与界面态的形成). 因此,低剂量率辐照时感生界面态陷阱电荷引起阈值电压的漂移量远大于高剂量率辐照时的值.

从图 2 和图 3 看到,高剂量率辐照后进行室温退火使得氧化物陷阱电荷由于热激发效应和隧穿效应发生退火,减小了电场强度,此时有部分 H^+ 运输到达 Si—SiO₂ 界面,与 Si—H 键反应生成界面态. 但是由于室温退火时只有少量的氧化物陷阱电荷发生退火,导致产生的后界面态不可能和低剂量率辐照下产生的一样多,室温退火后高剂量率下界面陷阱电荷引起阈值电压的漂移量要小于低剂量率辐照下的值^[17]. 因此,最终我们观察到了此种非加固 4007 电路中 PMOSFET 具有 ELDRS 效应,即低剂量率辐射损伤比高剂量率辐射损伤更为显著,并且这种损伤的差异不能通过与低剂量率辐照时间相同的室温退火加以消除.

5. 结 论

研究了一种非加固 4007 电路中 PMOSFET 在不同剂量率条件下的电离辐射损伤效应及高剂量率辐照后的退火效应. 通过分析辐射环境下氧化物陷阱电荷与界面态陷阱电荷形成的原因,发现此种非加固 4007 电路中 PMOSFET 产生低剂量率损伤增强效应主要是由于界面态陷阱电荷引起的. 高剂量率时,大量氧化物陷阱电荷形成的电场阻碍了界面态的形成;低剂量率时,生成的氧化物陷阱电荷较少,生成的界面态陷阱电荷引起的 ΔV_{th} 远大于高剂量率辐照时的值,最终使得低剂量率辐照下阈值电压的漂移量远大于高剂量率辐照时的值. 该模型也证实了两种辐射诱导陷阱电荷形成之间存在密切关系. 我们认为,这种非加固 4007 电路中 PMOSFET 产生 ELRDS 效应一是取决于空穴和 H^+ 的迁移率(H^+ 具有较小的迁移率,空穴具有较大的迁移率),二是取决于氧化物陷阱电荷产生的内电场.

感谢孙静在论文撰写过程中的讨论.

- [1] Sun J, Guo Q, Zhang J, Ren D Y, Lu W, Yu X F, Wen L, Wang G L, Zheng Y Z 2009 *Microelectronics* **39** 128 (in Chinese) [孙静、郭旗、张军、任迪远、陆妩、余学锋、文林、王改丽、郑玉展 2009 微电子学 **39** 128]
- [2] Fan L, Ren D Y, Guo Q, Yan R L, Zhu G W, Wang S J, Liang J B 2002 *Nucl. Electron. Detect. Technol.* **22** 289 (in Chinese) [范隆、任迪远、郭旗、严荣良、朱光武、王世金、梁金宝 2002 核电子学与探测技术 **22** 289]
- [3] Fleetwood D M, Winokur P S, Schwank J R 1988 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **35** 1497
- [4] Kim S J, Seon J, Min K W, Shin Y H, Choe W 2003 *Radiation and its Effects on Components and Systems Conference* 669 Huis Ter Duin, The Netherlands, 15—19 September 2003
- [5] Bogorad A L, Likar J J, Moyer S K, Ditzler A J, Doorley G P, Herschitz R 2008 *Radiation Effects Data Workshop* 124
- [6] Zheng Y Z, Lu W, Ren D Y, Wang Y Y, Guo Q, Yu X F, He C F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5572 (in Chinese) [郑玉展、陆妩、任迪远、王义元、郭旗、余学锋、何承发 2009 物理学报 **58** 5572]
- [7] Chen W H, Du L, Zhuang Y Q, Bao J L, He L, Zhang T F, Zhang X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4090 (in Chinese) [陈伟华、杜磊、庄奕琪、包军林、何亮、张天福、张雪 2009 物理学报 **58** 4090]
- [8] Wang J P, Xu N J, Zhang T Q, Tang H L, Liu J L, Liu C Y, Yao Y J, Peng H L, He B P, Zhang Z X 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1331 (in Chinese) [王剑屏、徐娜军、张廷庆、汤华莲、刘家璐、刘传洋、姚育娟、彭宏论、何宝平、张正选 2000 物理学报 **49** 1331]
- [9] Mewhorter P J, Winokur P S 1986 *Appl. Phys. Lett.* **48** 133
- [10] Fan L, Jin T, He C F, Yan R L, Shen Z K 1998 *Nucl. Tech.* **21** 534 (in Chinese) [范隆、靳涛、何承发、严荣良、沈志康 1998 核技术 **21** 534]
- [11] Rashkeev S N, Cirba C R, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Witzak S C, Michez A, Pantelides S T 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 2650
- [12] Mrstik B J, Rendell R W 1991 *Appl. Phys. Lett.* **59** 3012
- [13] Witzak S C, Laco R C, Mayer D C, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Galloway K F 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 2339
- [14] Rashkeev S N, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Pantelides S T 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 165506
- [15] Bunson P E, Di Ventura M, Pantelides S T, Fleetwood D M, Schrimpf R D 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 2289
- [16] Rashkeev S N, Cirba C R, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Witzak S C, Michez A, Pantelides S T <http://www.nsrec.com/summary/example.pdf> [2010-6-10]
- [17] Lan B 2010 *M. S. Dissertation* (Urumqi: Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [兰博 2010 硕士学位论文(乌鲁木齐:中国科学院新疆理化技术研究所)]

Theoretical model of enhanced low dose rate sensitivity observed in p-type metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

Gao Bo¹⁾²⁾³⁾ Yu Xue-Feng¹⁾³⁾ † Ren Di-Yuan¹⁾³⁾ Cui Jiang-Wei¹⁾²⁾³⁾
Lan Bo¹⁾²⁾³⁾ Li Ming¹⁾²⁾³⁾ Wang Yi-Yuan¹⁾²⁾³⁾

1) (*Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*)

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

3) (*Xinjiang Autonomous Region Key Laboratory of Electronics Information Material and Device, Urumqi 830011, China*)

(Received 14 July 2010; revised manuscript received 9 September 2010)

Abstract

In this paper, the ionizing damage effects and the annealing behaviors of an import product, p-type metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (PMOSFET), an unhardened 4007 circuit under different doses are investigated. We measure the sub-threshold I - V characteristic curves of PMOSFET under different bias doses. The dependence of the drift of threshold voltage on total dose is discussed. We also observe the relationship between the parameter and the annealing time. The experiment results show that the PMOSFET of this kind can enhance low dose rate sensitivity (ELDRS) effect. The interface-trap formation by H^+ transmission in the SiO_2 is explained. We believe that the interface trap is a primary reason to induce ELDRS effect of PMOSFET. We also discuss the physical model of enhancing low dose rate sensitivity effect of PMOSFET.

Keywords: p-type metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, ^{60}Co γ -ray, total-dose irradiation damage effects, enhanced low dose rate sensitivity

PACS: 61. 82. Fk, 61. 80. Ed, 85. 30. Tv, 98. 70. Rz

† Corresponding author. E-mail: yuxf@ms.xjb.ac.cn