

深亚微米器件沟道长度对总剂量辐照效应的影响

胡志远^{1)2)†} 刘张李¹⁾²⁾ 邵华¹⁾ 张正选¹⁾ 宁冰旭¹⁾²⁾ 毕大炜¹⁾ 陈明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 100039)

(2011年3月12日收到; 2011年7月4日收到修改稿)

研究了 180 nm 互补金属氧化物半导体技术下的器件沟道长度对总剂量辐照效应的影响. 在其他条件如辐照偏置、器件结构等不变的情况下, 氧化层中的陷阱电荷决定了辐照响应. 浅沟槽隔离氧化层中的陷阱电荷使得寄生的侧壁沟道反型, 从而形成大的关态泄漏电流. 这个电流与沟道长度存在一定的关系, 沟道长度越短, 泄漏电流越大. 首次发现辐照会增强这个电流的沟道长度调制效应, 从而使得器件进一步退化.

关键词: 总剂量效应, 浅沟槽隔离, 氧化层陷阱正电荷, 金属氧化物半导体场效晶体管

PACS: 07.80.+b, 24.50.+g

1 引言

随着器件尺寸不断缩小, 超薄栅氧被广泛应用于先进的互补金属氧化物半导体 (CMOS) 技术. 这将导致总剂量辐照在栅氧中引入的陷阱电荷大大减少, 阈值电压 (V_{th}) 漂移变得可以忽略不计^[1-3]. 这个特性也被 $1/f$ 噪声测试所证明. 噪声测试结果显示在栅氧界面附近没有形成明显的缺陷^[4,5]. 然而浅沟槽隔离 (shallow trench isolation, STI) 氧化层并没有同步的微缩, 在先进技术中它仍然有几百个纳米的厚度. 由于阈值电压的漂移是与氧化层厚度的平方成正比^[3], 所以总剂量辐照效应将对 STI 产生严重影响. 在 (N 沟道金属氧化物半导体, NMOS) 器件中, 辐照在 STI 氧化层中引入氧化层陷阱正电荷, 这些电荷在电场作用下移动至氧化物/衬底界面, 使得侧壁反型, 从而形成从漏端到源端的关态泄漏电流^[6,7]. 图 1 为此效应的示意图. 如图所示, 一个 NMOS 晶体管可以等效为一个主晶体管和两个寄生晶体管并联. 俘获在 STI 中的氧化层陷阱正电荷使得这个两个寄生晶体管沟道反型, 从而形成侧壁的电泄放路径.

本工作中, 我们以 180 nm CMOS 工艺的 NMOS 器件作为研究对象, 探讨了器件沟道长度对总剂量辐照效应的影响. 研究发现, 在保持其他条件不变的情况下, 沟道长度越短, 辐照引起

的关态泄漏电流越大. 同时, 辐照还会增强寄生晶体管的沟道长度调制效应, 从而使得器件性能进一步退化.

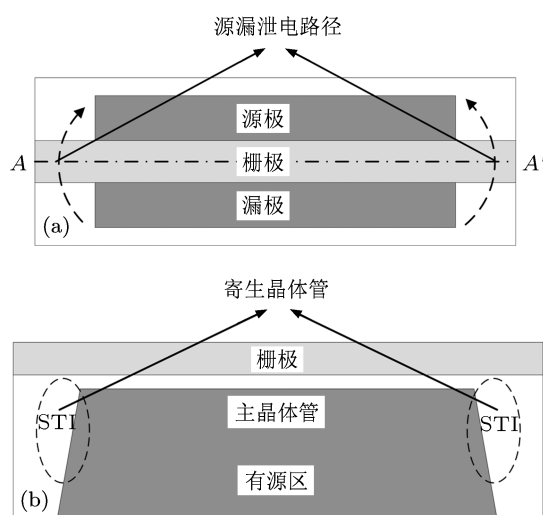


图 1 (a) 普通 NMOS 晶体管的版图以及源漏的泄漏电路径示意图; (b) 为沿 (a) 中虚线 A—A' 方向的截面图; 可以看到, 一个 NMOS 晶体管可以等效为一个主晶体管和两个寄生晶体管并联

2 器件辐照实验

实验样品为 180 nm CMOS 工艺 NMOS 器件. 采用浅沟槽 STI 作为器件隔离层. STI 中填充的是

† E-mail: zhiyuan.hu@gracesemi.com

高密度等离子体 (high density plasma, HDP) 二氧化硅. 氧化层的厚度约为 390 nm. 选用了不同尺寸的 NMOS 器件, 包括 W/L (宽/长) 为 $10\ \mu\text{m}/10\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m}/0.5\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}/0.18\ \mu\text{m}$; 它们的栅氧厚度均为 3 nm. 源和漏为 N 型高掺杂, 衬底为倒置的 P 阱, 工作电压为 1.8 V. 所有样品均为陶瓷封装.

器件辐照实验在中国科学院新疆理化技术研究所 $^{60}\text{Co}\gamma$ 射线辐照源下进行. 在辐照过程中, 所有器件的源、漏和衬底接地, 保持栅压为 1.8 V (即最恶劣偏置). 剂量率为 205 rad(Si)/s, 最大总剂量达到 500 krad(Si).

在辐照之前和每步辐照之后, 采用安捷伦公司的 HP4140B 精密半导体参数分析仪测量器件的 I - V 曲线. 测试的曲线包括线性区的转移特性曲线 ($I_{\text{DS}}-V_{\text{GS}}$, $V_{\text{DS}} = 0.05\ \text{V}$) 和在不同栅压 V_{GS} 下的输出特性曲线 ($I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$). 两步辐照实验之间的时间控制在半个小时之内.

3 结果与分析

3.1 $I_{\text{DS}}-V_{\text{GS}}$ 曲线

图 2 为 $W/L = 10\ \mu\text{m}/0.18\ \mu\text{m}$ 的典型 NMOS 器件在不同总剂量下 $I_{\text{DS}}-V_{\text{GS}}$ 特性曲线. 可以看到亚阈值区发生严重的退化而线性区 (即阈值电压以上的区域) 几乎没有受到影响. 相似的结果也被其他作者所报道 [8]. 这个现象可以用图 1 来理解. 一个 NMOS 晶体管可以等效为一个主晶体管和两个寄生晶体管并联. 这两个寄生晶体管是以 STI 作为等效的栅氧. 辐照之前, 它们的阈值电压很高, 从漏到源的泄漏电流很小. 但是在辐照之后, STI 中将俘获大量的氧化层陷阱正电荷, 这将导致寄生晶体管的阈值电压负向漂移. 当达到一定的辐照总剂量时, 在栅压为零时它们也会开启, 从而产生泄漏电流. 这个电流叠加到主晶体管的 I - V 曲线上使得器件的关态泄漏电流增加. 值得注意的是, 相比于主晶体管的开启电流来说, 这个泄漏电流是很小的, 所以它一般只影响 $I_{\text{DS}}-V_{\text{GS}}$ 曲线的亚阈区特性, 而对阈值电压以上的区域几乎没有影响. 而且, 在高剂量情况下, 关态泄漏电流也会逐渐趋向饱和 [9].

从图 2 中还可以看到, 器件的关态漏电流随着总剂量的增加而增加. 总剂量为 100 krad(Si) 时, 器件 I - V 曲线变化很小, 关态漏电流几乎没有变化, 这说明该器件在 100 krad(Si) 仍能保持很好的电学特性. 当总剂量增加到 300 krad(Si) 时, 器件的关态漏电流迅速增加到 nA 级, 说明此时的两个寄生晶

体管已经开启, 侧壁沟道已经形成反型层. 当总剂量达到 500 krad(Si) 时, 器件的漏电流达到 $10^{-7}\ \text{A}$, 比辐照前的漏电流 $10^{-12}\ \text{A}$ 高出 5 个数量级. 在该剂量下, 器件已经无法正常关断, 这将导致电路静态功耗增加甚至功能失效.

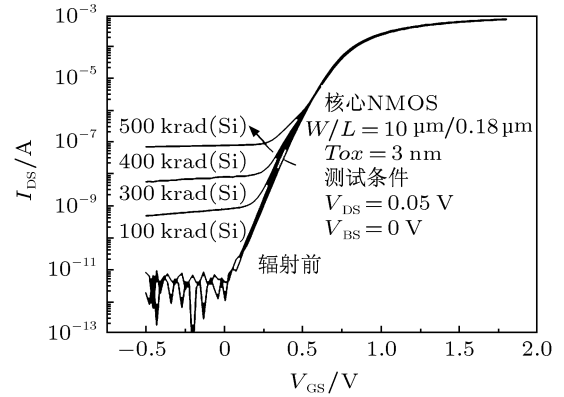


图 2 NMOS ($W/L = 10\ \mu\text{m}/0.18\ \mu\text{m}$) 辐照前 $I_{\text{DS}}-V_{\text{GS}}$ 特性曲线

3.2 总剂量辐照效应与沟道长度的关系

图 3 为不同沟道长度的 NMOS 器件关态漏电流与总剂量的关系. 关态漏电流定义为 $V_{\text{GS}} = 0\ \text{V}$, $V_{\text{DS}} = 0.05\ \text{V}$ 时的 I_{DS} 电流大小. 很明显, 沟道长度越短, 漏电流越大. 从 3.1 的讨论我们知道, 这个漏电流是由于两边的寄生晶体管开启导致

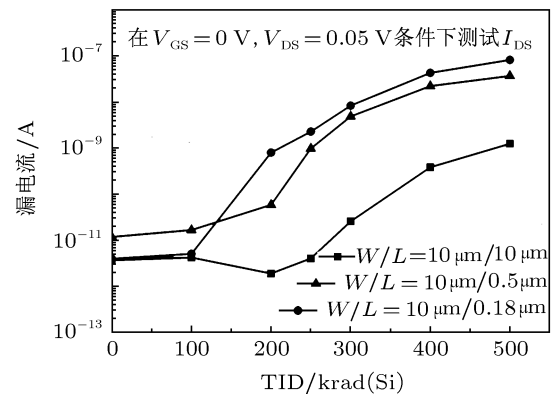


图 3 不同沟道长度器件的关态漏电流与 TID 的关系

的. 这两个晶体管的沟道长度与主晶体管的沟道长度相等, 所以, 主晶体管的沟道越短, 寄生晶体管的沟道也越短, 进而辐照导致的侧壁漏电流也越大. 如图 4 所示, 以总剂量 (TID) 500 krad(Si) 为例, 沟长为 $10\ \mu\text{m}$ 时, 漏电流大约为 $1.24 \times 10^{-9}\ \text{A}$; 而在沟长为 $0.5\ \mu\text{m}$, $0.18\ \mu\text{m}$ 时, 漏电流分别达到 $3.66 \times 10^{-8}\ \text{A}$ 和 $8.13 \times 10^{-8}\ \text{A}$. 漏电流的大小与沟长的倒数有一个近似的正比例关系. 可以预

测, 如果沟道长度进一步缩短, 漏电流将会继续增大. 所以, 短沟道器件在辐照环境应用性能退化更严重.

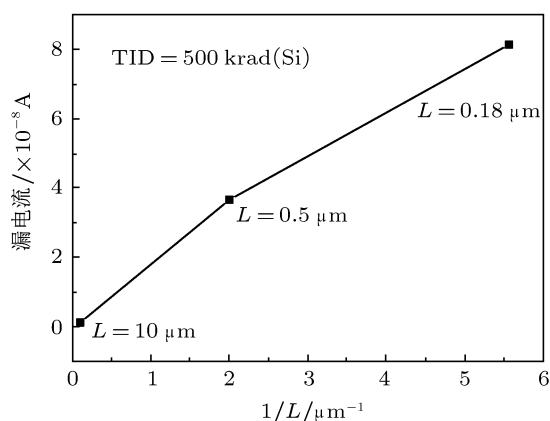


图4 TID 为 500 krad(Si) 时关态泄漏电流与沟道长度的关系

3.3 辐照增强的沟道调制效应

图 5(a) 和图 5(b) 分别为 $W/L = 10 \mu\text{m}/10 \mu\text{m}$ 和 $W/L = 10 \mu\text{m}/0.18 \mu\text{m}$ 的 NMOS 器件在栅压为 0 V 时, 不同 TID 下的输出特性曲线. 栅压为 0 V 时, 主晶体管处于关断状态, 所以这两个图其实就是寄生管的输出特性曲线. 在低剂量时 ($< 300 \text{ krad(Si)}$), 漏电流很小, 说明此时 STI 侧壁的反型层还没有形成. 当总剂量 $\geq 300 \text{ krad(Si)}$, STI 中俘获了足够的电荷, 导致侧壁反型, 形成漏电路径, 这和 3.1 的讨论结果一致. 同时还可以观察到, 在高剂量时, 漏电流与 V_{DS} 的关系可以分成两个区域: 第一个区域 (V_{DS} 较小时), 漏电流随着 V_{DS} 的增加而迅速增加; 而在第二个区域 (V_{DS} 较大时), V_{DS} 对漏电流的控制作用明显减弱. 特别是对长沟道的器件 ($10 \mu\text{m}/10 \mu\text{m}$), 在 $V_{\text{DS}} > 0.7 \text{ V}$ 时, 漏电流几乎达到饱和. 对于短沟道器件 ($10 \mu\text{m}/0.18 \mu\text{m}$), 漏电流随 V_{DS} 缓慢地增加, 这个现象和普通晶体管的输出特性曲线非常相似. 图 6(a) 和图 6(b) 分别为这两个器件辐照之前在不同栅压下的输出特性曲线, 也就是主晶体管的输出特性曲线. 曲线可以分为三个区域: 即截止区、线性区和饱和区^[10]. 我们认为图 5 和图 6 两者的原理是一样的, 唯一的区别在于图 5 是固定栅压 V_{GS} 而改变 TID; 而图 6 是固定 TID(辐照之前, 即 $\text{TID} = 0 \text{ krad(Si)}$) 而改变栅压. 实际上, 两者最终的表现是一样的. 这是因为, 输出特性曲线是由 V_{GS} 与 V_{th} 之间的相对关系决定的. $V_{\text{GS}} < V_{\text{th}}$ 时, 器件关断, 电流可以忽略不计; $V_{\text{th}} < V_{\text{GS}} < V_{\text{DSat}}$ 时, 器件处于线性区, 漏端电流正比于 V_{DS} ; $V_{\text{DS}} > V_{\text{DSat}} = V_{\text{GS}} - V_{\text{th}}$

时, 器件则进入饱和区. 在图 5 中, 虽然 V_{GS} 固定不变, 但随着 TID 的增加, 寄生晶体管的阈值电压 $V_{\text{th,parasitic}}$ 减小. 当 $V_{\text{th,parasitic}} > V_{\text{GS}} = 0 \text{ V}$, 晶体管处于关断状态, 此时侧壁漏电流很小. $V_{\text{th,parasitic}} < V_{\text{GS}} = 0 \text{ V}$ 时, 寄生晶体管开启, 电流沿着 STI 侧壁从漏端流向源端. 此时的寄生沟道类似于一个电阻, 在 V_{DS} 较小时, 漏电流正比于 V_{DS} . 但当 V_{DS} 较大时, 寄生晶体管的沟道发生夹断, 从而使得漏电流趋于饱和. 因此, 寄生晶体管的输出特性曲线也可以类似于普通晶体管一样分为线性区和饱和区. 同样地, 在短沟道 ($10 \mu\text{m}/0.18 \mu\text{m}$) 中, 寄生晶体管也表现出大家熟知的沟道长度调制效应 (channel-length modulation, CLM), 即在饱和区漏电流并不饱和, 而是随着 V_{DS} 的增加而缓慢增加. 这成为短沟道器件在辐照环境应用中的另一个限制因素.

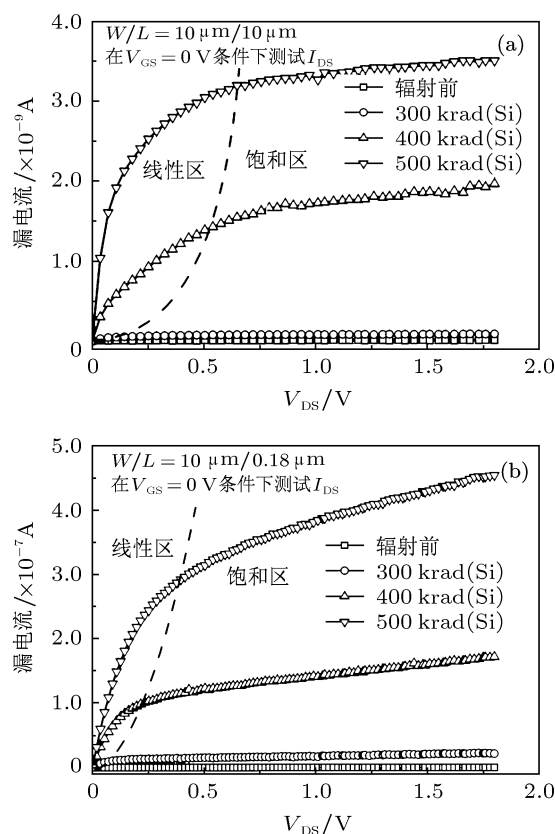


图5 寄生晶体管的输出特性曲线 (a) 器件尺寸为 $W/L = 10 \mu\text{m}/10 \mu\text{m}$; (b) 器件尺寸为 $W/L = 10 \mu\text{m}/0.18 \mu\text{m}$

另外, 仔细对比图 5(a) 和图 6(a), 图 5(b) 和图 6(b), 我们不难发现, 寄生晶体管在饱和区的曲线要比主晶体管的更加倾斜, 也就是说它在饱和区漏电流随栅源电压 V_{GS} 增大得更为明显, 也即 CLM 效应要更为严重. Youk 等^[11] 曾经报道过, 辐照在 STI 氧化层中产生的陷阱

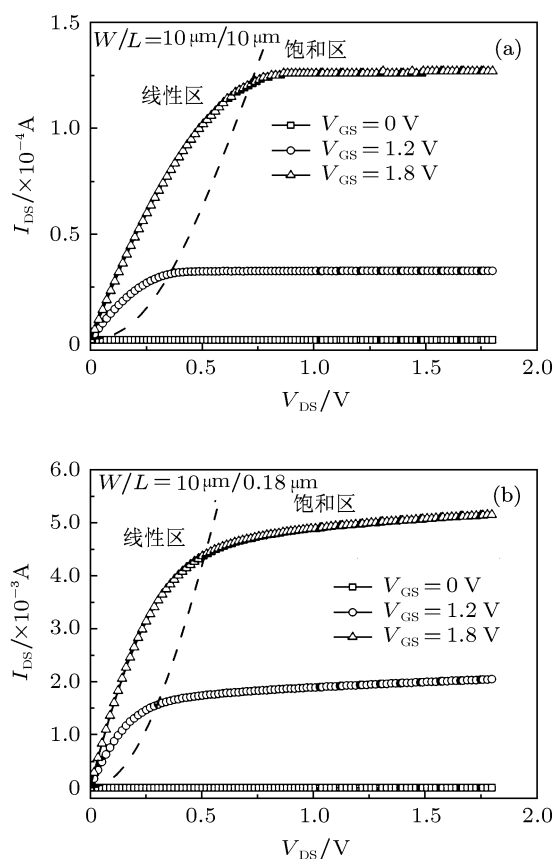


图6 NMOS晶体管在辐照之前的输出特性曲线 (a) 器件尺寸为 $W/L = 10 \mu\text{m}/10 \mu\text{m}$; (b) 器件尺寸为 $W/L = 10 \mu\text{m}/0.18 \mu\text{m}$

电荷会使得在 STI 侧壁形成耗尽层, 这个耗尽层与

源漏区域的耗尽层相互作用, 从而减小有效的沟道长度. 注意, 这个相互作用只是发生在 STI 侧壁附近, 所以只是寄生晶体管的有效沟道长度减小, 而主晶体管的有效沟道长度是不变的. 我们知道, 有效沟道长度越短, CLM 效应越明显. 这也就是为什么寄生晶体管在辐照之后 CLM 效应会加强的原因. 在高的漏端偏置情况下, CLM 增强效应将进一步增加器件的关态漏电流, 使得器件的特性更加恶化.

4 结论

本文研究了深亚微米下器件沟道长度与总剂量辐照效应的关系. 辐照在 STI 中产生陷阱电荷, 从而使得寄生晶体管开启形成关态泄漏电流. 关态泄漏电流与沟道长度的倒数近似成正比例关系. 沟道长度越短, 泄漏电流越大. 我们首次报道了寄生晶体管也存在沟道长度调制效应, 即在高漏端电压时, 电流并不饱和而是继续上升. 而且它的沟道长度调制效应要比主晶体管更为严重, 从而使得在高的漏端偏压下, 泄漏电流进一步增加. 总的来说, 短沟道器件的辐照效应要比长沟道更为恶劣. 在辐照环境中, 应尽量避免使用短沟道器件以提高电路整体的可靠性.

- [1] Schwank J R, Shaneyfelt M R, Fleetwood D M, Felix J A, Dodd P E, Paillet P, Ferlet-Cavrois V 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 1833
- [2] Zhang T Q, Liu C Y, Liu J L, Wang J P, Huang Z, Xu N J, He B P, Peng H L, Yao Y J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2434 (in Chinese) [张廷庆, 刘传洋, 刘家璐, 王剑屏, 黄智, 徐娜军, 何宝平, 彭宏论, 姚育娟 2001 物理学报 **50** 2434]
- [3] 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]
- [4] Esqueda I S, Barnaby H J, Alles L M 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2259
- [5] Faccio F, Barnaby H J, Chen X J, Fleetwood D M, Gonella L, McLain M, Schrimpf R D 2008 *Microelectronics Reliability* **48** 1000
- [6] Meng Z Q, Hao Y, Tang Y, Ma X H, Zhu Z W, Li Y K 2007 *Chin. J. Semiconduct.* **28** 241 (in Chinese) [孟志琴, 郝跃, 唐瑜, 马晓华, 朱志炜, 李永坤 2007 半导体学报 **28** 241]
- [7] Wang S H, Lu Q, Wang W H, An X, Huang R 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1970 (in Chinese) [王思浩, 鲁庆, 王文华, 安霞, 黄如 2010 物理学报 **59** 1970]
- [8] Gonella L, Faccio F, Silvestri M, Gerardin S, Pantano D, Re V, Manghisoni M, Ratti L, Ranieri A 2007 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **582** 750
- [9] McLain M, Barnaby H J, Holbert K E, Schrimpf R D, Shah H, Amort A, Baze M, Wert J 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 2210
- [10] Chen X B, Zhang Q Z 2008 *Transistor Principle and Design (Vol. 2)* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p297 (in Chinese) [陈星弼, 张庆忠 2008 晶体管原理与设计 (第2版)(电子工业出版社) 第297页]
- [11] Youk G U, Khare P S, Schrimpf R D, Massengill L W, Galloway K F 1999 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **46** 1830

The influence of channel length on total ionizing dose effect in deep submicron technologies

Hu Zhi-Yuan^{1)2)†} Liu Zhang-Li¹⁾²⁾ Shao Hua¹⁾ Zhang Zheng-Xuan¹⁾
Ning Bing-Xu¹⁾²⁾ Bi Da-Wei¹⁾ Chen Ming¹⁾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 100039, China*)

(Received 12 March 2011; revised manuscript received 4 July 2011)

Abstract

The influence of channel length on total ionizing dose effect in a 180 nm complementary metal-oxide semiconductor technology is studied. When other conditions such as radiation bias, device structure are the same, the overall radiation response is determined by the charges trapped in the oxide. The off-state leakage due to the charges trapped in the shallow trench isolation oxide inverting the parasitic sidewall channel has correlation with the channel length. A shorter channel leads to a larger leakage current. For the first time, we report that the leakage current also exhibits the radiation enhanced channel-length modulation effect, which further degrades the device performance.

Keywords: total ionizing dose, shallow trench isolation, oxide trapped charge, metal-oxide-semiconductor field effect transistor

PACS: 07.80.+b, 24.50+g

† E-mail: zhiyuan.hu@gracesemi.com