

# 电离辐射中 SOI MOSFETs 的背栅异常 kink 效应研究\*

刘 洁<sup>1,2,3,†</sup> 周继承<sup>1</sup> 罗宏伟<sup>2</sup> 孔学东<sup>2</sup> 恩云飞<sup>2</sup> 师 谦<sup>2</sup> 何玉娟<sup>2</sup> 林 丽<sup>2</sup>

(1 中南大学物理科学与技术学院, 长沙 410083)

(2 电子元器件可靠性物理及其应用技术国家级重点实验室, 广州 510610)

(3 中南大学材料科学与技术学院, 长沙 410083)

**摘要:** 采用 10keV X 射线研究了部分耗尽 SOI MOSFETs 的总剂量辐射效应. 实验结果显示, 在整个辐射剂量范围内, 前栅特性保持良好; 而 nMOSFET 和 pMOSFET 的背栅对数  $I_d-V_{g2}$  曲线中同时出现了异常 kink 效应. 分析表明电离辐射在埋氧/顶层硅(BOX/SOI)界面处产生的界面态陷阱是导致异常 kink 效应产生的原因. 基于 MEDICI 的二维器件模拟结果进一步验证了这个结论.

**关键词:** X 射线; SOI MOSFETs; 部分耗尽; kink 效应; 总剂量效应

**PACC:** 6180C; 7340

**中图分类号:** TN306

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2008)01-0149-04

## 1 引言

绝缘体上硅(SOI)技术在辐射加固领域应用的优势主要来自绝缘埋氧层, 埋氧结构的存在能够实现单个晶体管的全介隔离, 有效消除了体硅 CMOS 器件的门锁效应和减小了单粒子翻转截面. 但在总剂量环境中, 埋氧中建立的陷阱电荷能漂移阈值电压, 严重时将增大泄漏电流, 并最终造成工作器件和电路的功能失效. 近年关于 SOI 技术的总剂量辐射损伤机理和加固技术吸引了众多研究者的兴趣<sup>[1~3]</sup>, 然而 SOI MOS 器件中复杂的多界面系统和 SOI 材料独有的制备技术为研究的深入带来了困难, 很多研究涉及背栅晶体管的辐射响应时会忽略 BOX/SOI 界面效应的作用<sup>[4,5]</sup>. 本文将基于部分耗尽 SOI MOSFETs 在总剂量辐射中出现的背栅异常 kink 效应对 BOX/SOI 的界面效应进行研究.

## 2 实验

实验样品 SOI MOSFETs 采用 0.8 $\mu$ m 部分耗尽 SOI CMOS 工艺制备. SOI 材料由 SIMOX 工艺形成, 埋氧厚度为 375nm, 顶层硅和栅氧厚度分别为 200nm 和 17.5nm. SOI nMOS 和 pMOS 来自同一圆片, 均采用 H 形栅版图设计, 宽长比为 24 $\mu$ m/0.8 $\mu$ m, 并做有外部体接触, 每种样品数量均为 3 个.

辐照和电测试实验在电子元器件可靠性物理及其应用技术国家级重点实验室进行, 其中辐照实验在 ARACOR 4100 半导体辐射系统上进行, 辐射源为 10keV X 射线, 剂量率为 15krad(Si)/min, 实验器件采用开盖辐照. 辐射偏置为前栅晶体管的最劣条件, 设置

见表 1. 采用半导体参数分析仪 HP-4155A 对晶体管进行电测试, 每次电测试在辐照后的 30min 内完成. 所有的实验和测试都在室温下进行.

## 3 结果与讨论

### 3.1 前栅器件的辐射特性

图 1(a), (b) 分别为 SOI nMOS 和 pMOS 晶体管在不同辐射剂量下的前栅对数  $I_d-V_g$  特性. 随着辐射剂量的累积, 栅氧中和栅氧/Si 界面处建立的陷阱电荷导致阈值电压逐渐负向漂移, 亚阈斜率发生退化. 但在整个辐射剂量范围内, 前栅特性保持良好, 电流中没有出现边界泄漏成分, 这得益于版图设计中采用的无边 H 形栅结构, 避免了辐射中边界泄漏电流通道在源漏端间的开启.

### 3.2 背栅器件的辐射特性

#### 3.2.1 辐照实验结果

从 X 射线辐照前后 SOI nMOSFET 和 pMOSFET 的背栅对数  $I_d-V_{g2}$  特性(图 2(a), (b))中观察到, 分别在 500 和 200krad(Si)时, nMOS 和 pMOS 曲线的亚阈区间内出现了明显的“隆起”现象. 这种“隆起”类似于辐射诱生边界传导开启所产生的亚阈 kink 效应<sup>[6]</sup>, 但实验样品采用无边 H 形栅版图设计, 且前栅主晶体管电流中边界泄漏可以忽略(见图 1), 因此可以排除边界

表 1 辐照偏置条件

Table 1 Radiation bias conditions

nMOS	$V_g = 5V$ $V_d = V_s = V_{body} = V_{g2} = 0V$
pMOS	$V_g = V_s = V_{body} = 5V$ $V_d = V_{g2} = 0V$

\* 实验室基金项目(批准号:9140C0306010604)和重点项目(批准号:A1220060979)资助项目

† 通信作者. Email: liujie863@mail.csu.edu.cn

2007-06-17 收到, 2007-08-13 定稿

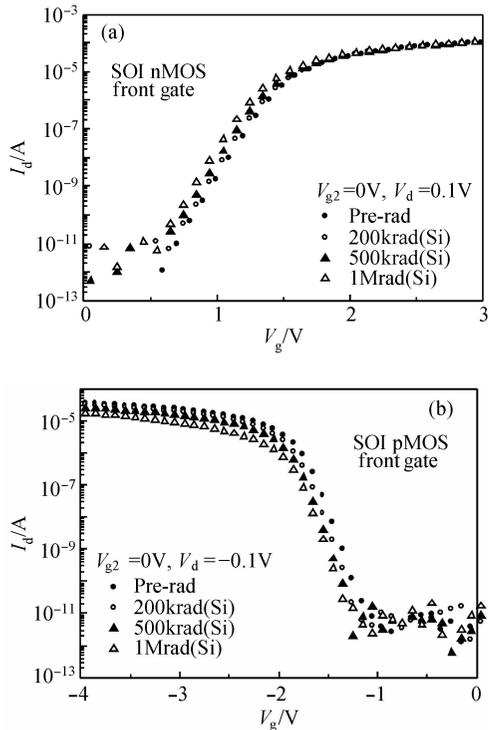


图 1 不同辐射剂量下 SOI MOS 器件的前栅  $I_d$ - $V_g$  特性 (a) nMOS-FET; (b) pMOSFET

Fig.1  $I_d$ - $V_g$  characteristic of front-gate for MOS devices on SOI sample irradiated under different total doses (a) nMOS-FET; (b) pMOSFET

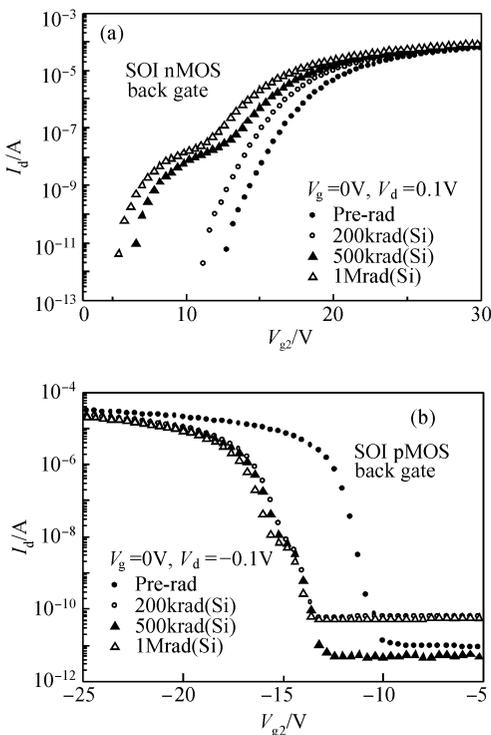


图 2 不同辐射剂量下 SOI MOS 器件的背栅  $I_d$ - $V_{g2}$  特性 (a) nMOS-FET; (b) pMOSFET

Fig.2  $I_d$ - $V_{g2}$  characteristic of back-gate for MOS devices on SOI sample irradiated under different total doses (a) nMOS-FET; (b) pMOSFET

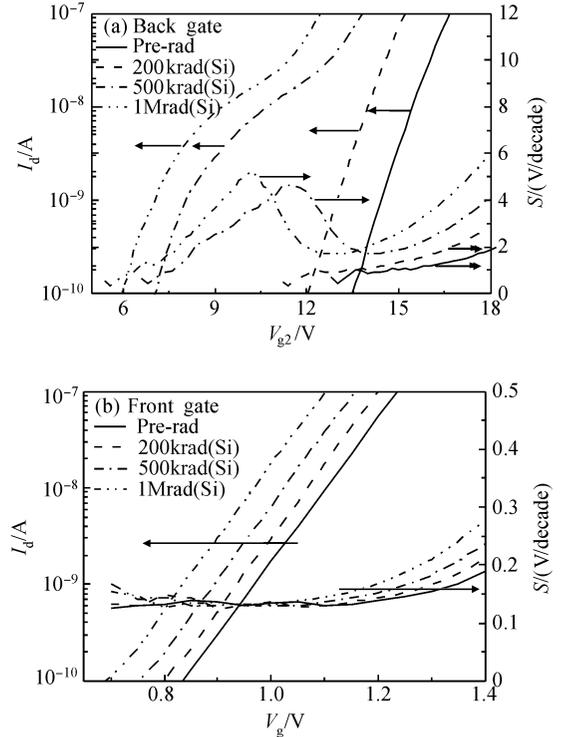


图 3 SOI nMOSFET 的背栅(a)和前栅(b)的亚阈特性 漏电流(左侧 y 轴)和亚阈摆幅(右侧 y 轴)

Fig.3 Back gate (a) and front gate (b) subthreshold characteristic for SOI nMOSFET drain current (left y axis) and subthreshold swing (right y axis)

传导的作用. 类似的 kink 现象出现在质子辐照到 300krad(Si)时,  $0.25\mu\text{m}$  全耗尽 SOI nMOS 晶体管的背栅线性  $I_d$ - $V_{g2}$  曲线中<sup>[7]</sup>, 并归因于电离辐射在埋氧/顶层硅(BOX/SOI)界面处产生的界面态陷阱的作用.

### 3.2.2 辐照实验结果分析及 MEDICI 模拟

在本次实验的 SOI nMOS 晶体管中, 背栅对数  $I_d$ - $V_{g2}$  曲线内的异常 kink 在亚阈特性中的具体体现如图 3 (a)所示, 左侧 y 轴为漏电流  $I_d$ , 右侧 y 轴为亚阈摆幅  $S$  ( $S = [\partial(\lg I_d) / \partial V_{g2}]^{-1}$ ). 结果显示, 辐射前和 200krad (Si) 辐射后的亚阈摆幅分别为 1.063 和 1.056V/decade,  $S$  在亚阈区间内近似为一条平直直线; 出现 kink 的曲线中(500krad 和 1Mrad), 亚阈摆幅不再在亚阈区间内保持常数, 而随栅电压的变化出现峰值. 根据 MOS 晶体管的特性, 功函数差和氧化物陷阱电荷的变化能在栅电压方向平行漂移  $I_d$ - $V_g$  特性, 而界面态陷阱的变化则能改变  $I_d$ - $V_g$  特性的亚阈斜率, 即亚阈摆幅<sup>[8]</sup>, 因此此处亚阈摆幅峰值的出现应该是来自界面态陷阱的作用. 而前栅晶体管在整个辐射剂量范围内并没有观察到类似的亚阈摆幅峰值现象(见图 3(b)), 表明造成背栅亚阈斜率变化的界面态陷阱位于埋氧/硅界面处.

向负栅压方向隆起的 kink 可以看成初始时器件的亚阈特性有额外的负向漂移, 背栅电压的增加促使亚阈特性逐渐向正常状态正向回漂, 并最终恢复到正常状态的过程. 这表明出现异常 kink 的器件中有额外正电荷形成, 且在亚阈范围内这些正电荷会随着背栅电压的增

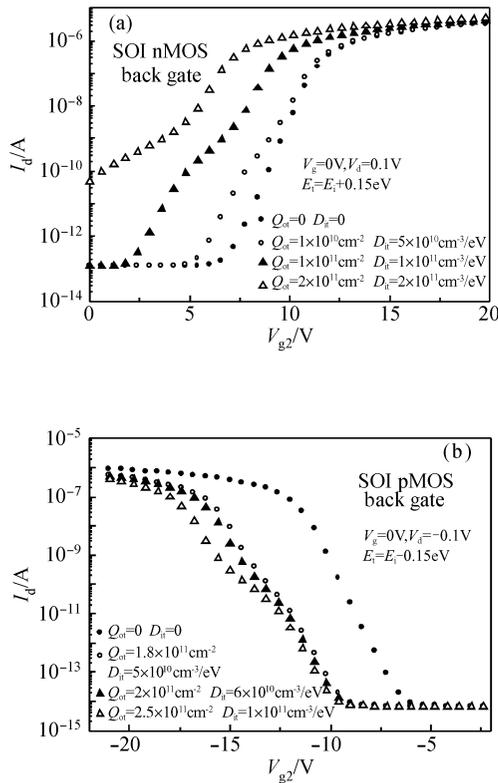


图 4 模拟不同辐射剂量下器件的背栅  $I_d-V_{g2}$  特性 (a) nMOSFET; (b) pMOSFET

Fig.4  $I_d-V_{g2}$  characteristic of back-gate for MOS devices on SOI sample simulated with different total irradiation doses (a) nMOSFET; (b) pMOSFET

加而逐渐减少,并最终消失. nMOSFET 中满足这种现象的只有界面处位于硅禁带中的施主态电子陷阱<sup>[8]</sup>.

SIMOX SOI 材料在制备过程中会在埋氧/顶层硅界面处留下松散的 Si—O, Si—Si 键或氧空位<sup>[9]</sup>, 电离辐射能进一步弱化或断裂这些化学键, 从而在硅禁带中产生能量局域化的界面态陷阱. 通常辐射在栅氧/顶层硅处产生的界面态陷阱在带隙中呈 U 形分布, 作用于器件后引起亚阈斜率的退化. 如果要在亚阈区间内形成 kink, 界面态陷阱近似为单能级分布. 此时根据费米-狄拉克统计, 界面态陷阱的电荷态可以通过费米分布函数确定, 即由陷阱能级  $E_t$  与费米能级  $E_f$  的相对位置决定. 在较低背栅电压范围内, nMOSFET 中施主态电子陷阱的能级  $E_t$  位于费米能级  $E_f$  以上, 陷阱为空的正电中心, 这些带正电的陷阱电荷是亚阈特性初始额外负向漂移的起因, 而漂移量  $\Delta V_{it}$  随背栅电压的变化则满足<sup>[8,9]</sup>:

$$\Delta V_{it} = -\frac{q}{C_{ox2}} \int_{E_i - q\phi_F - q\psi_{s2}}^{E_c} D_{it}(E) dE \quad (1)$$

其中  $\phi_F$  为费米势;  $\psi_{s2}$  为背表面势;  $E_c$  为硅导带底能量;  $C_{ox2}$  为埋氧层电容;  $D_{it}(E)$  为界面态陷阱的态密度. 当  $|E_t - E_f|$  值随着背栅电压的增加而逐渐减少时, 电子陷阱为中性占据态的几率增加, 正电中心减少,  $\Delta V_{it}$  开始减少. 当背栅电压增至  $E_t$  与  $E_f$  重合时, 陷阱占据态的几率和空态几率相同, 即中性陷阱与正电陷阱的数量

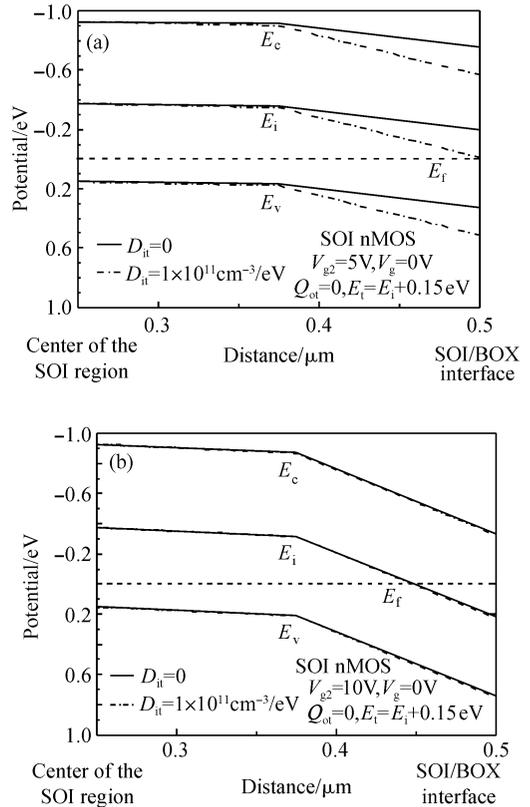


图 5 模拟不同背栅电压下 nMOSFET 顶层硅中的一维电势分布 (a)  $V_{g2} = 5V$ ; (b)  $V_{g2} = 10V$

Fig.5 One-dimension distribution of the electric potential in the top-silicon for nMOSFET simulated with different voltages on the back-gate (a)  $V_{g2} = 5V$ ; (b)  $V_{g2} = 10V$

相同, 到达极值处. 随着  $E_t$  跨过  $E_f$ , 占据态的中性陷阱进一步增加, 相应的正电中心减少, 直至完全消失, 这个过程在对数  $I_d-V_{g2}$  曲线中表现为 kink, 在亚阈摆幅曲线中导致峰值出现.

为了验证这个结论, 采用二维器件仿真软件 MEDICI 对 SOI nMOSFET 进行模拟<sup>[10]</sup>. 本文中的模拟只是再现实验规律, 并不是对实验数据的完全拟合, 因此忽略器件结构参数及其他因素的影响. 模拟中用  $Q_{ot}$  表示辐射在埋氧中建立的正氧化物陷阱电荷的数量,  $D_{it}$  表示 SOI/BOX 处产生的界面态陷阱的态密度, nMOSFET 中界面态陷阱类型为施主态电子陷阱,  $E_t$  为陷阱能级,  $E_t$  的取值以本征费米能级  $E_i$  作为能量参考点. 模拟中用  $Q_{ot}$  和  $D_{it}$  量的增加表示辐射剂量的累积. 图 4(a) 给出了模拟 nMOSFET 不同辐射剂量下的背栅对数  $I_d-V_{g2}$  曲线, 图中随着  $D_{it}$  的增加, 异常 kink 效应逐渐明显, 模拟曲线很好地再现了这种实验现象 (见图 2(a)).

模拟顶层硅中的一维电势分布能更加直观地说明施主态电子陷阱的作用过程. 如图 5(a) 所示, 亚阈区间内 ( $V_{g2} = 5V$ ) 的陷阱能级位于费米能级以上而带正电, 作用等效于在背栅上附加一个正向电场, 使得能带在 BOX/SOI 界面处有进一步的向下弯曲; 器件开启后 ( $V_{g2} = 10V$ , 见图 5(b)), 陷阱能级全部位于费米能级以

下成为中性占据态,此时态密度  $D_{it} = 0$  和  $D_{it} = 10^{11} \text{ cm}^{-3}/\text{eV}$  条件下的电势分布完全重合,陷阱对器件的作用消失.

SOI pMOSFET 的情况类似,只有在 BOX/SOI 处产生受主态空穴陷阱才能产生图 2(b)中的 kink<sup>[8]</sup>. 模拟曲线(图 4(b))与实验曲线(图 2(b))的变化规律非常吻合. 图 4 和图 5 中基于 MEDICI 的二维模拟结果验证了我们的推断,即电离辐射能在部分耗尽 SOI MOSFETs 的 BOX/SOI 处产生界面态陷阱,其中 nMOSFET 中产生的是施主态电子陷阱, pMOSFET 中产生的是受主态空穴陷阱. 在背栅电压的作用下,界面态陷阱与硅进行电荷交换,使得陷阱的电荷态发生改变,作用于器件后表现为背栅对数  $I_d-V_{g2}$  曲线中异常 kink 效应的产生.

## 4 结论

本文给出了制备于 SIMOX 圆片上的部分耗尽 nMOSFET 和 pMOSFET 的 10keV X 射线辐射数据. 通过对辐射中背栅对数  $I_d-V_{g2}$  曲线中异常 kink 效应的分析,得到如下结论:

(1) 类似于栅氧/SOI 界面,电离辐射同样能在背栅 BOX/SOI 界面产生界面态陷阱. 在 nMOSFET 的 BOX/SOI 界面处产生施主态的电子陷阱,在 pMOSFET 中产生受主态的空穴陷阱. 随着辐射剂量的累积,界面态陷阱的态密度不断增加.

(2) 近似于单能级分布的 BOX/SOI 界面态陷阱服从费米-狄拉克统计,背栅电压通过改变背表面势决定了界面态陷阱与硅所进行的电荷交换过程,反映在器件特性中为背栅对数  $I_d-V_{g2}$  曲线中“隆起”形状的 kink 发生.

## 参考文献

- [1] Zhang Enxia, Qian Cong, Zhang Zhengxuan, et al. Effect of nitrogen implantation technologies on total dose rad-hardness of SIMON materials. Chinese Journal of Semiconductors, 2005, 26(6): 1269 (in Chinese) [张恩霞, 钱聪, 张正选, 等. 注氮工艺对 SOI 材料抗辐射性能的影响. 半导体学报, 2005, 26(6): 1269]
- [2] He Yujuan, Shi Qian, Li Bin, et al. Study of X-ray total effect in SOI MOSFET. Semiconductor Technology, 2006, 31(5): 357 (in Chinese) [何玉娟, 师谦, 李斌, 等. SOI MOSFET 器件 X 射线总剂量效应研究. 半导体技术, 2006, 31(5): 357]
- [3] Luo Hongwei, Yang Yintang, En Yunfei, et al. The influence of X-ray irradiation on nMOSFET. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, 24(3): 246 (in Chinese) [罗宏伟, 杨银堂, 恩云飞, 等. nMOSFET X 射线辐射影响研究. 核电子学与探测技术, 2004, 24(3): 246]
- [4] Boesch H E Jr, Taylor T L Jr. Time-dependent radiation-induced charge effects in wafer-bonded SOI buried oxides. IEEE Trans Nucl Sci, 1992, 39(6): 2103
- [5] Liu S T, Jenkins W C, Hughes H L, et al. Total dose radiation induced back channel threshold voltage shifts and standby currents of CMOS devices fabricated in UNIBOND™ materials. Proc Electrochemical Soc, 1997, PV97-23: 307
- [6] Ushiki T, Kotani K, Funaki T, et al. New aspects and mechanism of kink effects in static back-gate transconductance characteristics in fully-depleted SOI MOSFET's on high-dose SIMOX wafers. IEEE Trans Electron Devices, 2000, 47: 360
- [7] Li Ying, Niu Guofu, Cressler J D, et al. Anomalous radiation effects in fully depleted SOI MOSFETs fabricated on SIMOX. IEEE Trans Nucl Sci, 2001, 48(6): 2146
- [8] Ma T P, Dressendorfer P V. Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits. New York: Wiley, 1989
- [9] Torres A, Flament O. Analysis of total dose tolerance of LOCOS isolated MOSFET by 2-D self-consistent simulations. IEEE Trans Nucl Sci, 2002, 49(3): 1462
- [10] User's Manual, 1998 MEDICI: Two dimensional devices simulation program

## A Novel Back-Gate Kink Effect in SOI MOSFETs During Ionizing Irradiation\*

Liu Jie<sup>1,2,3,†</sup>, Zhou Jicheng<sup>1</sup>, Luo Hongwei<sup>2</sup>, Kong Xuedong<sup>2</sup>, En Yunfei<sup>2</sup>,  
Shi Qian<sup>2</sup>, He Yujuan<sup>2</sup>, and Lin Li<sup>2</sup>

(1 Department of Physics Science and Technology, Zhongnan University, Changsha 410083, China)

(2 National Key Laboratory for Reliability Physics and Application Technology of Electronic Components, CEPREI, Guangzhou 510610, China)

(3 Department of Material Science and Technology, Zhongnan University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Total dose irradiation effects of partially depleted SOI MOSFETs are studied under 10keV X-ray exposure. Results show that the front-gate characteristics do not change significantly during irradiation. An anomalous kink is observed in the back-gate logarithmic curve of both nMOS and pMOS, which is attributed to charged traps at the buried oxide/top silicon (BOX/SOI) interface during irradiation. Two-dimensional numerical simulation using MEDICI supports this conclusion.

**Key words:** X-ray; SOI MOSFETs; partially depleted; kink effect; total-dose irradiation

**PACC:** 6180C; 7340

**Article ID:** 0253-4177(2008)01-0149-04

\* Project supported by the Foundation of Laboratory (No. 9140C0306010604) and the Key Foundation (No. A1220060979)

† Corresponding author. Email: liujie863@mail.csu.edu.cn

Received 17 June 2007, revised manuscript received 13 August 2007