

# 总剂量辐照条件下部分耗尽半导体氧化物绝缘层 N 沟道金属氧化物半导体器件的三种 kink 效应\*

卓青青<sup>†</sup> 刘红侠 彭里 杨兆年 蔡惠民

(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 20 日收到; 2012 年 8 月 23 日收到修改稿)

研究了 0.8  $\mu\text{m}$  SOINMOS 晶体管, 经过剂量率为 50 rad (Si)/s 的  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线辐照后的输出特性曲线的变化趋势. 研究表明, 经过制造工艺和版图的优化设计, 在不同剂量条件下, 该样品均不产生线性区 kink 效应. 由碰撞电离引起的 kink 效应, 出现显著变化的漏极电压随总剂量水平的提高不断增大. 在高剂量辐照条件下, 背栅  $I_D$ - $V_{\text{SUB}}$  曲线中出现异常的“kink”现象, 这是由辐照诱生的顶层硅膜/埋氧层之间的界面陷阱电荷导致的.

**关键词:** 总剂量效应, kink 效应, 碰撞电离, 背栅异常跨导

**PACS:** 61.80.Ed, 61.80.Jh, 73.40.Qv, 24.50.+g

**DOI:** 10.7498/aps.62.036105

## 1 引言

半导体氧化物绝缘层 (SOI) 器件具有寄生电容小、功耗低、速度快、集成密度高、耐高温、无闩锁等一系列优势. 此外, 隔离埋氧层极大的减小 SOI 结构的电荷收集体积, 具有更好的抗瞬时辐射和抗单粒子效应的能力. 但是在总剂量辐射效应中, SOI 结构的埋氧层中的陷阱会俘获大量的空穴, 使 SOI 器件泄漏电流增大, 阈值电压负向漂移<sup>[1-3]</sup>.

近些年来, 国内外学者针对总剂量辐射效应进行了深入的研究, 主要涉及辐照引起的器件性能退化及其物理机理<sup>[4-10]</sup>. 文献 [4] 提出并通过数值模拟验证了全耗尽 SOI 器件中, 带带隧穿 (BBT: band-to-band tunneling) 和埋氧层的陷阱电荷共同作用导致辐照器件泄漏电流增大的现象. 文献 [5] 研究了重离子辐照之后, 金属氧化物半导体 (MOS) 器件的直接性能退化, 以及电应力条件下呈现的辐照潜在缺陷. 随着器件尺寸的缩小, 栅氧化层厚度

不断降低, 在超薄栅 SOI 器件中会产生直接隧穿电流, 出现线性 kink 效应<sup>[6-9]</sup>. 在足够高的漏极电压下, 由于碰撞电离, 部分耗尽 SOINMOS 器件饱和区电流增加, 输出特性曲线翘曲<sup>[10,11]</sup>. 但对于不同的制造工艺和版图设计, 总剂量辐照的 SOI 器件呈现出不同的退化行为, 关于这些特殊现象, 目前仍然没有成熟的理论解释.

本文研究了沟道长度为 0.8  $\mu\text{m}$  的 H 栅部分耗尽 N 金属氧化物半导体 (NMOS) 晶体管, 经剂量率为 50 rad (Si)/s 的  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线辐照后, 样品输出特性的变化规律. 结果表明, H 型栅体接触设计以及较厚的栅氧化层厚度, 使辐照样在不同剂量时, 都不会产生显著的线性区 kink 效应. 在高漏压条件下, 碰撞电离空穴在体区积累, 提高了体区的电势. 器件的阈值电压降低, 漏极电流增加, 输出特性曲线出现由碰撞电离引起的 kink 现象. 最后, 作者在背栅的转移特性曲线中发现了异常的“kink”现象, 即当背栅扫描到一定电压值时, 阈值电压突然增大的现象.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61076097, 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: 200110203110012) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: qqzhuo@stu.xidian.edu.cn

## 2 器件结构和辐照设置

本文研究的样品是  $0.8\ \mu\text{m}$  SOINMOS 晶体管, 栅氧化层和埋氧层的厚度分别是  $12.5\ \text{nm}$  和  $375\ \text{nm}$ . 图 1 是该样品的版图示意图, 器件宽长比  $W/L=8\ \mu\text{m}/0.8\ \mu\text{m}$ , 且采用带两个  $\text{P}^+$  体引出端的 H 栅结构, 并且使用硅岛隔离与 LOCOS 隔离相结合的氧化台面隔离技术, 有效地抑制总剂量辐照条件下的边缘晶体管效应<sup>[12]</sup>.

总剂量辐照实验使用西北核技术研究所的  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线源照射, 选取的剂量率为  $50\ \text{rad}(\text{Si})/\text{s}$ , 辐照前后器件的电参数测量是通过 HP4156A 半导体精密参数测试仪来完成的. 总剂量测试点分别为  $200\ \text{krad}(\text{Si})$ ,  $500\ \text{krad}(\text{Si})$ ,  $1000\ \text{krad}(\text{Si})$ , 达到设定剂量点对器件进行移位测试. 为了确保辐照测试数据的精确性, 每次测量在  $30\ \text{min}$  之内完成. 辐照过

程中器件处于开态偏置, 栅电极  $V_G=5\ \text{V}$ , 其他电极都接地. 测试过程中器件的偏置条件如表 1 所示, 其中  $V_G, V_S, V_D, V_B$  和  $V_{\text{SUB}}$  分别是栅极、源极、漏极、体电极和衬底电极施加的电压. 背栅  $I_D-V_{\text{SUB}}$  曲线的测量按照前栅转移特性测量的方法进行, 只是将背电极作为栅极.

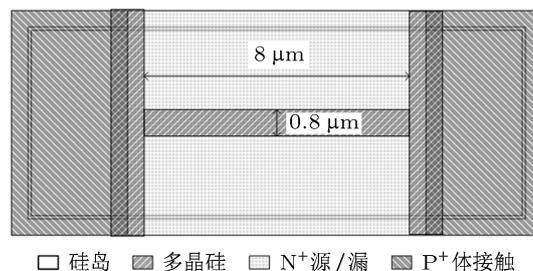


图 1 H 型栅部分耗尽 SOI 器件的版图示意图

表 1 SOI NMOS 器件测试时的偏置条件

测试时器件偏置条件		$V_G/\text{V}$	$V_S/\text{V}$	$V_D/\text{V}$	$V_B/\text{V}$	$V_{\text{SUB}}/\text{V}$
前栅转移特性	低漏压	-1—5	0	0.1	0	0
	高漏压	-1—5	0	5	0	0
背栅转移特性	低漏压	0	0	0.1	0	-10—50

## 3 实验结果分析

本文研究了沟道长度为  $0.8\ \mu\text{m}$  的 H 栅部分耗尽 NMOS 晶体管, 经剂量率为  $50\ \text{rad}(\text{Si})/\text{s}$  的  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线辐照后, 样品输出特性的变化规律. 图 2 是样品在总剂量辐照前的输出特性曲线. 由图可见, 在器件饱和区, 漏极电流随栅极电压增加而有所增大. 输出特性曲线翘曲, 表现出不饱和的趋势, 这种现象称为 kink 效应<sup>[10,11]</sup>. 下面本文主要针对样品中出现的 kink 效应, 不同剂量条件下 kink 效应的表现及其产生的物理机制进行深入分析.

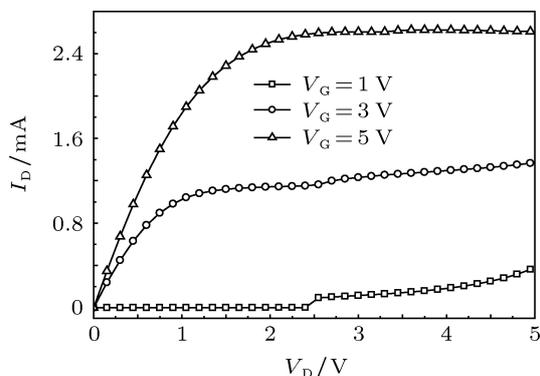


图 2 部分耗尽 SOI NMOS 器件的前栅输出特性曲线

### 3.1 线性区的 kink 效应

随着器件尺寸的缩小, 栅氧化层减薄, 器件工作时引起直接隧穿电流, 使部分耗尽 SOI 器件中出现所谓的线性区 kink 效应 (LKE: linear kink effect)<sup>[6-9]</sup>. 表现为在器件的转移特性曲线中, 器件阈值电压降低, 漏极电流突然增大, 并且跨导曲线出现第二个峰值.

图 3 是漏极电压  $V_D=0.1\ \text{V}$  时, 不同剂量条件下样品的前栅跨导曲线  $g_{\text{mf}}-V_G$  和转移特性曲线  $I_D-V_G$ . 可以看出随剂量增加, 样品的转移特性曲线和跨导曲线依次负向漂移. 但是当栅极电压从  $-1\ \text{V}$  扫描到  $5\ \text{V}$  的整个过程中, 不同剂量条件下的转移特性曲线都没有出现因为体电位升高而导致的阈值电压突然减小的趋势; 跨导曲线也没有出现第二个峰值, 所以样品在不同剂量下, 都没有产生显著的线性区 kink 效应.

分析其原因: 首先, 样品的栅氧化层厚度为  $12.5\ \text{nm}$ , 是文献 [6] 中  $2.5\ \text{nm}$  的栅介质厚度的 5 倍, 不容易引起直接隧穿电流. 其次, 本文研究的样品采用了带两个  $\text{P}^+$  体引出端的 H 栅结构. 虽然隧穿形成的少量空穴在漂移到体接触电极之前, 会因为

体电阻产生一定的电压降,但大部分都流向低电位的体引出电极.因此作者认为,图2中样品输出特性曲线的翘曲现象不是由垂直电场引起的隧穿电流导致的.

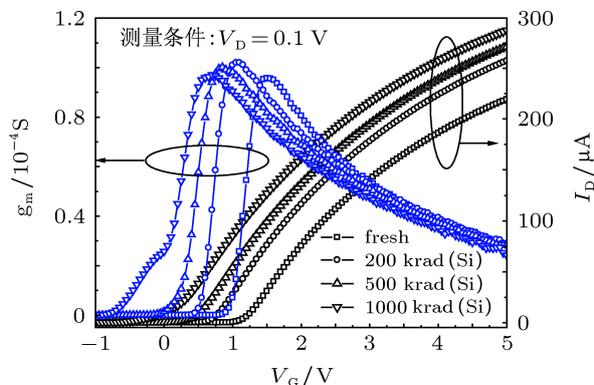


图3 不同剂量时样品的前栅 (a) 跨导和 (b) 转移特性曲线

### 3.2 碰撞电离引起的 kink 效应

图4是不同剂量条件下,样品的前栅转移特性曲线.可以看到随着总剂量水平的增加,转移特性曲线负向漂移.当栅极电压 $V_G$ 增加到阈值电压附近时,样品发生碰撞电离,漏极电流突然增大几个数量级.

因为在高压条件下( $V_D = 5\text{ V}$ ),沟道电子在漏端高电场区获得足够的能量,通过碰撞电离产生电子空穴对.空穴向体区移动,堆积在体区,从而抬高了体区的电势.样品的阈值电压降低,漏极电流增大.同时,随着辐照剂量的增加,栅氧化层俘获正的陷阱电荷不断积累也引起样品阈值电压下降.因为阈值电压的减小,样品的饱和电压 $V_{DSAT}$  ( $V_{DSAT} \approx V_G - V_{TH}$ ,  $V_{DSAT}$ 是饱和漏电压,  $V_{TH}$ 是阈值电压)增大,饱和夹断点向漏极靠近,载流子碰撞电离化区缩短,沟道表面碰撞电离倍增因子下降,样品漏极电流增大的趋势减弱.因而从图4中看到,当剂量为1000 krad (Si),漏极电流增大的趋势减弱.

以此推理,作者认为图2样品的输出特性曲线中,电流不饱和的翘曲现象也是由在足够高的漏极电压下,沟道电子发生碰撞电离引起的.虽然器件加了H栅体接触结构,但是由于体接触位置和器件沟道距离不同,碰撞电离产生的空穴电荷堆积在体区.当体区电势上升时,器件的阈值电压降低,漏极电流增大.但是,体区空穴会很快地流向体接触,体电势的升高没有超过体/源结的势垒差,寄生NPN

晶体管(源-衬底-漏相当于发射区-基区-集电区)不会开启.因此,和部分耗尽的浮体器件相比,样品的漏极电流并没有出现明显的“扭结”现象.

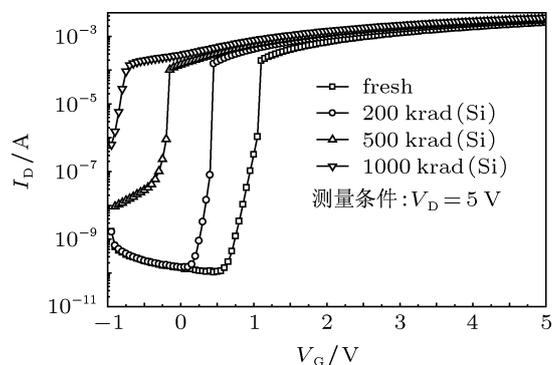


图4 不同剂量时样品的前栅转移特性曲线

图2中随着栅极电压的增大,漏极电流随漏极电压增大的趋势减弱.当 $V_G = 1\text{ V}$ 时,该样品未开启,开始样品的漏极电流很小.当漏极电压增大到2.5 V时,沟道电子在漏端高电场区发生碰撞电离,产生大量电子空穴对,漏极电流突然增大.当 $V_G = 5\text{ V}$ 时,漏极电流几乎不再随漏极电压增大,电流基本饱和.这和图4中随着剂量增大,漏极电流增大的趋势减弱的原因是一致的.图2中随着栅极电压的增大,器件的饱和电压 $V_{DSAT}$  ( $V_{DSAT} \approx V_G - V_{TH}$ )增大,漏极电流增大的趋势减弱.最后,碰撞电离现象消失,漏极电流几乎恢复正常趋势.

图5是当栅极电压 $V_G = 1\text{ V}$ 时,不同剂量条件下实验样品的输出特性曲线.对照图2和图5,发现图2中不同栅压下的输出特性曲线和图5中不同辐照剂量条件下的曲线非常相似<sup>[14]</sup>.图5未辐照之前的 $I_D$ - $V_D$ 曲线中,漏极电压从0 V增加到5 V的整个过程中,该器件未开启,漏极电流较小.随着辐照剂量的增加,栅氧化层中俘获正的陷阱电荷不断积累,栅极有效电压随之增大.当总剂量达到200 krad (Si)时,器件导通,漏极电流随漏极电压逐渐增大,呈现出饱和的趋势.

从图5中还可以看到,不同总剂量条件下,kink出现显著变化的漏极电压是不同的.在较高的剂量时,kink效应出现显著变化的漏极电压的位置也较高.这是因为随着总剂量的增加,样品的阈值电压减小,沟道表面碰撞电离倍增因子下降.因此随总剂量水平提高,样品的漏极电流随电压增大的显著变化点增大,漏极电流增大的趋势也减弱.另外,不

同总剂量下,漏极电流还会受到辐照诱生的界面态的影响.样品载流子迁移率下降,漏极电流增大的趋势也会有所减小.

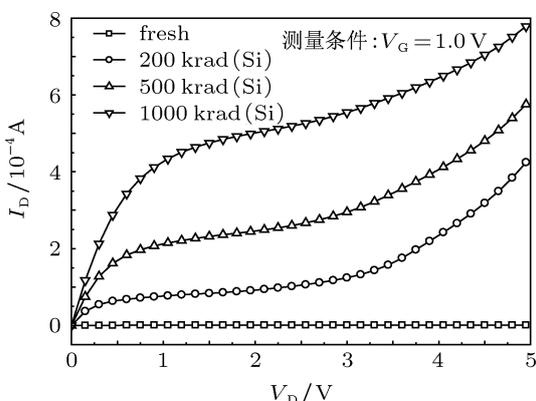


图5 不同剂量条件下样品的输出特性曲线

### 3.3 背栅异常的“kink”效应

图6和图7分别是不同剂量条件下,样品的背栅转移特性曲线和跨导曲线.可以看到,随着剂量的提高,背栅转移特性曲线和跨导曲线均负向漂移,并且背栅  $I_D$ - $V_{SUB}$  曲线斜率减小.当剂量增加到500 krad (Si) 时,器件背栅的扫描电压达到一定值时,背栅阈值电压突然增大,跨导曲线中对应出现明显的低谷.作者把这种反常的跨导现象,称为异常的背栅“kink”效应<sup>[13]</sup>.

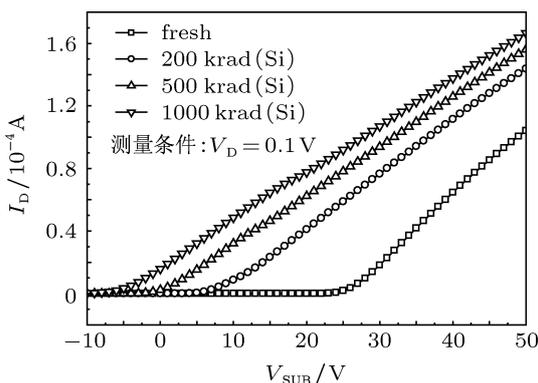


图6 不同剂量时样品的背栅转移特性曲线

因为总剂量辐照条件下,部分耗尽SOI晶体管埋氧层中的陷阱不仅俘获了大量的空穴电荷,使背栅  $I_D$ - $V_{SUB}$  曲线负向漂移.同时,辐照在顶层硅

膜/埋氧层界面,诱生界面态,这些界面态在硅的禁带中形成了一些分立或连续的电子能级.MOS器件是表面沟道器件,一方面沟道电子要受到辐照诱生的界面态的散射作用,迁移率降低;另一方面,沟道电子填充界面态陷阱,沟道电子密度减小.这两者都是导致随着剂量的增大,漏极电流上升趋势减弱,跨导减小的原因.

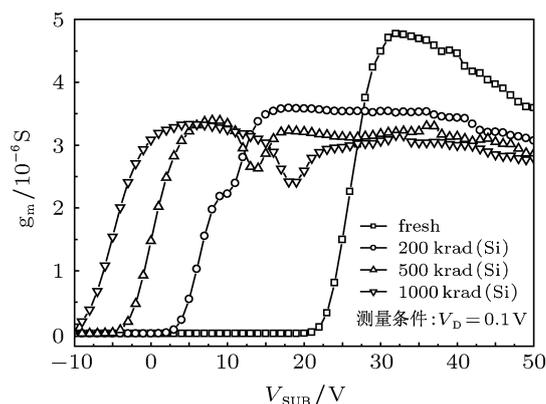


图7 不同剂量时样品的背栅跨导曲线

跨导曲线中明显的低谷现象,作者认为这是由辐照诱发的背栅施主界面态俘获沟道电子造成的.如图8所示,当背栅电极施加正的电压时,顶层硅膜/埋氧层界面的能带逐渐向下弯曲,费米能级  $E_F$  相对于界面态能级  $E_t$  的位置升高.界面态上电子填充的几率将随之变化,因而界面态电荷也发生变化.当背栅电压大于一定值  $V_{SUBTH}$  时,施主界面态(空着时带正电荷,电子占据时为中性)俘获反型层电子变成电中性,其效果是削弱能带弯曲程度和减少界面处的电子电荷<sup>[14]</sup>.因此,随着背栅电压增大到  $V_{SUBTH}$  时,图6中开始出现阈值电压增大的现象.当沟道电子填满界面的施主界面态时,图7的跨导曲线中出现明显的低谷.

从图7中还可以看到,跨导低谷对应的背栅电压随总剂量提高而增大.当剂量为500 krad (Si),跨导在背栅电压  $V_{SUB} = 13.5$  V 时出现低谷;当剂量为1000 krad (Si),跨导出现类似的低谷对应的背栅电压为18.5 V.这是因为随着剂量的增大,辐照在顶层硅膜/埋氧层界面产生的施主界面态增多,所以需要提高背栅电压,在沟道中感应出更多的电子电荷来填充施主界面态.因而随着剂量的增大,图7中的跨导低谷对应的背栅电压增大.

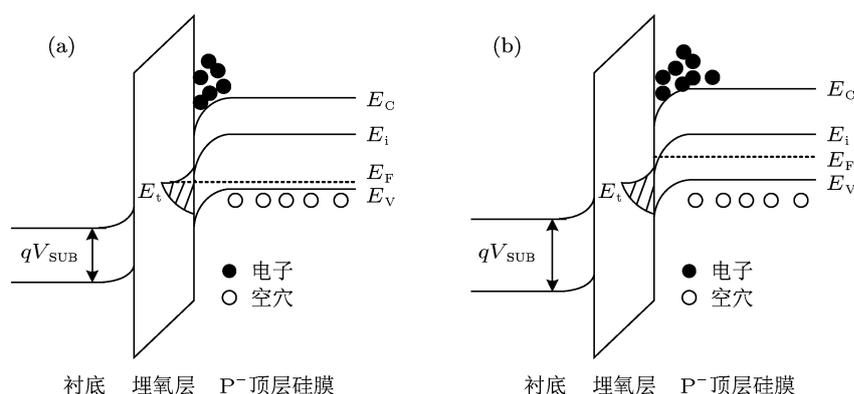


图 8 沟道电子填充施主界面态能级的示意图 (a)  $V_{SUB} < V_{SUBTH}$ ; (b)  $V_{SUB} \geq V_{SUBTH}$

## 4 结论

本文分析了经 50 rad (Si)/s 的  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线的辐照之后, 沟道长度为 0.8  $\mu\text{m}$  的部分耗尽 SOIMOS 器件的总剂量辐射效应, 揭示了三种不同 kink 效应的产生机理. 研究表明, 本文研究的样品, 栅氧化层厚度较厚, 栅和衬底之间直接隧穿电流很小. 由于隧穿导致的体区空穴电流太小, 这是样品中没有观察到线性区 kink 效应的主要原因. 在漏极电压足够高的时候, 当栅极电压扫描到阈值电压附近,

沟道区产生一定的载流子. 当沟道电子在漏端高场区获得足够能量, 通过碰撞电离产生电子空穴对. 虽然器件进行了  $\text{P}^+$  体引出设计, 但是由于体接触和器件沟道距离不同, 体区仍然会产生电压降. 引起 SOI 器件阈值电压降低, 漏极电流增加, 输出特性曲线中出现 kink 现象. 论文还分析了背栅异常的“kink”效应, 确定背栅异常的跨导低谷是由总剂量辐射效应诱生的背栅施主界面态俘获沟道电子造成的.

- [1] Schwank J R, Ferlet-Cavrois V, Shaneyfelt M R, Paillet P, Dodd P E 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 522
- [2] Schwank J R, Shaneyfelt M R, Fleetwood D M, Felix J A, Dodd P E, Paillet P, Ferlet-Cavrois V *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 1833
- [3] Barnaby H J 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3103
- [4] Adell P C, Barnaby H J, Schrimpf R D, Vermeire B 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 2174
- [5] Cester A, Gerardin S, Paccagnella A, Schwank J R, Vizkelethy G, Candelori A, Ghidini G 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3150
- [6] Mercha A, Rafi J M, Simoen E, Augendre E, Claeys C 2003 *IEEE Trans. Electron Dev.* **50** 1675
- [7] Chen S S, Lu S H, Tang T H 2004 *IEEE Trans. Electron Dev.* **51** 575
- [8] Chen S S, Lu S H, Tang T H 2004 *IEEE Trans. Electron Dev.* **25** 214
- [9] Chen S S, Lu S H, Tang T H 2004 *IEEE Trans. Electron Dev.* **51** 708
- [10] Liu Z L, Hu Z Y, 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]
- [11] Hu Z Y, Liu Z L, Shao H, Zhang Z X, Ning B X, Bi D W, Chen M, Zou S C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 050702 (in Chinese) [胡志远, 刘张李, 邵华, 张正选, 宁冰旭, 毕大炜, 陈明, 邹世昌 2012 物理学报 **61** 050702]
- [12] Huang R, Zhang G Y, Li Y X, Zhang X 2005 *Technology and Application of SOI CMOS* (Vol. 1) (Beijing: Science Press) p136 (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 136 页]
- [13] Ushiki T, Kotani K, Funaki T, Kawai K, Ohmi T 200 *IEEE Trans. Electron Dev.* **47** 360
- [14] Liu E K, Zhu B S, Luo J S 2003 *Semiconductor Physics* (Vol. 4) (Beijing: National Defense Industry Press) p216 (in Chinese) [刘恩科, 朱秉升, 罗晋生 2003 半导体物理学 (北京: 国防工业出版社) 第 216 页]

# Mechanism of three kink effects in irradiated partially-depleted SOINMOSFET's\*

Zhuo Qing-Qing<sup>†</sup> Liu Hong-Xia Peng Li Yang Zhao-Nian Cai Hui-Min

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

(Received 20 June 2012; revised manuscript received 23 August 2012)

## Abstract

The variations in  $I_D$ - $V_D$  characteristic of 0.8  $\mu\text{m}$  SOINMOS transistors are studied, which are exposed to  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  ray at a dose rate of 50 rad (Si)/s. The results show that the linear kink effects of these samples at each dose level are not present due to the optimizations of manufacture process and layout design. The drain voltage that corresponds to the impact ionization induced kink effect, increases, with dose level. An anomalous "Kink" effect in the back gate  $I_D$ - $V_{\text{SUB}}$  characteristics of the partially depleted SOINMOS transistors is observed at a high dose level, which is attributed to interface trap states generated at the buried oxide/silicon film interface during irradiation.

**Keywords:** total dose effect, kink, impact ionization, back-gate anomalous transconductance

**PACS:** 61.80.Ed, 61.80.Jh, 73.40.Qv, 24.50.+g

**DOI:** 10.7498/aps.62.036105

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61076097, 60936005), Cultivation Fund of the Key Scientific and Technical Innovation Project, Ministry of Education of China (Grant No. 708083) and Specialized Research Fund for the Central University of Higher Education, China (Grant No. 200110203110012).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: qqzhuo@stu.xidian.edu.cn