

超深亚微米互补金属氧化物半导体器件的剂量率效应

郑齐文 崔江维 王汉宁 周航 余德昭 魏莹 苏丹丹

Dose-rate sensitivity of deep sub-micro complementary metal oxide semiconductor process

Zheng Qi-Wen Cui Jiang-Wei Wang Han-Ning Zhou Hang Yu De-Zhao Wei Ying Su Dan-Dan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 076102 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.076102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.076102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I7>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

总剂量效应致  $0.13\mu\text{m}$  部分耗尽绝缘体上硅 N 型金属氧化物半导体场效应晶体管热载流子增强效应

Enhanced channel hot carrier effect of  $0.13\mu\text{m}$  silicononinsulator N metaloxidesemiconductor fieldeffect transistor induced by total ionizing dose effect

物理学报.2016, 65(9): 096104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.096104>

电离辐射环境下的部分耗尽绝缘体上硅 n 型金属氧化物半导体场效应晶体管可靠性研究

Reliability of partially-depleted silicon-on-insulator n-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor under the ionizing radiation environment

物理学报.2015, 64(8): 086101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.086101>

深亚微米金属氧化物场效应晶体管及寄生双极晶体管的总剂量效应研究

Radiation effect of deep-submicron metal-oxide-semiconductor field-effect transistor and parasitic transistor

物理学报.2014, 63(22): 226101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.226101>

静态随机存储器总剂量辐射损伤的在线与离线测试方法

Online and offline test method of total dose radiation damage on static random access memory

物理学报.2014, 63(8): 086101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.086101>

$^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线辐照 CMOS 有源像素传感器诱发暗信号退化的机理研究

Research on dark signal degradation in  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray-irradiated CMOS active pixel sensor

物理学报.2014, 63(5): 056102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.056102>

# 超深亚微米互补金属氧化物半导体器件的 剂量率效应\*

郑齐文<sup>1)2)</sup> 崔江维<sup>1)2)†</sup> 王汉宁<sup>4)</sup> 周航<sup>1)2)3)</sup> 余德昭<sup>1)2)3)</sup>  
魏莹<sup>1)2)</sup> 苏丹丹<sup>1)2)3)</sup>

1) (中国科学院新疆理化技术研究所, 中国科学院特殊环境功能材料与器件重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

2) (新疆电子信息材料与器件重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

4) (北京微电子技术研究所, 北京 100076)

(2015年11月3日收到; 2016年1月26日收到修改稿)

对 0.18  $\mu\text{m}$  互补金属氧化物半导体 (CMOS) 工艺的 N 型金属氧化物半导体场效应晶体管 (NMOSFET) 及静态随机存储器 (SRAM) 开展了不同剂量率下的电离总剂量辐照试验研究. 结果表明: 在相同累积剂量, SRAM 的低剂量率辐照损伤要略大于高剂量率辐照的损伤, 并且低剂量率辐照损伤要远大于高剂量率辐照加与低剂量率辐照时间相同的室温退火后的损伤. 虽然 NMOSFET 低剂量率辐照损伤略小于高剂量率辐照损伤, 但室温退火后, 高剂量率辐照损伤同样要远小于低剂量率辐照损伤. 研究结果表明 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺器件的辐射损伤不是时间相关效应. 利用数值模拟的方法提出了解释 CMOS 器件剂量率效应的理论模型.

**关键词:** 总剂量辐射效应, 超深亚微米, 金属氧化物半导体场效应晶体管, 静态随机存储器

**PACS:** 61.80.Ed, 61.82.Fk, 85.30.Tv, 07.85.-m

**DOI:** 10.7498/aps.65.076102

## 1 引言

自 1991 年 Enlow 等<sup>[1]</sup> 首次报道双极器件低剂量率辐射损伤增强效应以来, 关于双极器件和线性集成电路的低剂量率辐射效应研究成为研究的重点, 国内外开展了大量的关于损伤响应、机理、评估方法等方面的研究<sup>[2-5]</sup>. 双极器件的总剂量辐射损伤是由基射结上方覆盖的隔离氧化物导致, 该氧化物层厚度较厚且电场较弱, 高剂量率辐照产生的大量氧化物陷阱电荷形成的空间电场大小与其外加电场可比拟, 导致了双极器件的低剂量率增强效应<sup>[6]</sup>.

对于互补金属氧化物半导体 (CMOS) 器件, 以往的研究认为其在不同剂量率辐射期间, 基本没有发生不同的过程, 差别仅仅在于氧化物陷阱电荷退

火及界面陷阱电荷增长时间相关性的不同, 只是时间相关效应而非真正的剂量率效应<sup>[7]</sup>. 在此基础上制定的标准规定可以用实验室高剂量率辐射加常温退火的方法来模拟低剂量率辐射损伤<sup>[8]</sup>.

CMOS 器件的总剂量辐射损伤与工艺尺寸密切相关: 微米、亚微米工艺 CMOS 器件的总剂量辐射损伤来源于栅氧化物, 而对于超深亚微米、纳米工艺 CMOS 器件, 其总剂量辐射损伤则主要来源于浅槽隔离 (shallow trench isolation, STI) 氧化物<sup>[9]</sup>. CMOS 器件中的金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 栅氧厚度薄, 其中的电场约为 1 MV/cm 量级, 远大于双极器件基区氧化物电场 (小于 0.1 MV/cm), 因此以前的研究认为在栅氧化物对辐射损伤起主要作用的 MOSFET 中, 基本不存在不同剂量率之间的差异, 而是时间相关效应.

\* 中国科学院西部之光项目 (批准号: XBBS201219) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: cuijw@ms.xjb.ac.cn

然而,随着器件尺寸缩小,STI氧化物引起的辐射损伤越来越突出,而STI主要由高密度等离子体氧化物填充,其满足低剂量率增强效应厚氧弱电场的条件,很可能造成CMOS器件低剂量率损伤增强效应.近年来,文献[10—12]研究了超深亚微米工艺N型金属氧化物半导体场效应晶体管(NMOSFET)的剂量率效应,结果均显示超深亚微米CMOS器件的确存在剂量率效应,但是损伤增强的程度不同,对低剂量率损伤增强的解释也存在差别. Steven等[10]认为低剂量率辐照下的较低的俘获空穴退火率是导致CMOS低剂量增强效应的直接原因, Johnston等[11]分析低剂量率辐照下电子空穴较低的复合率导致了CMOS器件的低剂量率增强效应, Ivan等[12]则认为双极器件的低剂量率增强机理可用来解释CMOS器件所表现出的剂量率效应.

本文对0.18 μm CMOS工艺的NMOSFET及静态随机存储器(SRAM)开展了不同剂量率的辐照试验,研究了超深亚微米CMOS器件的剂量率效应,并提出现解释CMOS器件剂量率效应的理论模型.

## 2 试验条件

高、低剂量率辐照试验分别在中国科学院新疆理化技术研究所的大、小钴源进行. 试验样品为NMOSFET及SRAM电路, NMOSFET在国内工艺线流片, SRAM为商用器件. 试验样品NMOSFET为条形栅, 宽长比为40 μm/0.18 μm, 栅氧厚度3.6 nm, 对其分别开展剂量率为0.8, 0.001, 0.0005 Gy(Si)/s的辐照试验, 辐照总剂量为3000 Gy(Si), 辐照偏置条件为ON, 即栅端接电源电压, 其余端接地. 在辐照前后及中间剂量点分别测试器件的转移、输出曲线. SRAM器件型号为HM62 V8100 I, 分别开展剂量率为0.8和0.0005 Gy(Si)/s的辐照试验, 辐照总剂量为1200 Gy(Si), 辐照偏置条件为静态偏置. 在辐照前后及中间剂量点分别测试器件的直流、交流及功能参数.

## 3 试验结果

图1显示了在0.8 Gy(Si)/s的剂量率辐照后, 不同辐照总剂量下NMOSFET器件的转移特性曲线变化, 横坐标表示的是栅源电压, 纵坐标表示的

是源漏电流, 从图中可以看出器件关态泄漏电流在一定剂量辐照后显著上升. 辐照在NMOSFET的STI中产生的氧化物陷阱电荷使器件的寄生晶体管导通, 进而使主晶体管的转移特性曲线中出现明显的关态漏电流, 且关态漏电流的数值大小反映了辐照在STI中产生氧化物陷阱电荷数量的多少[13].

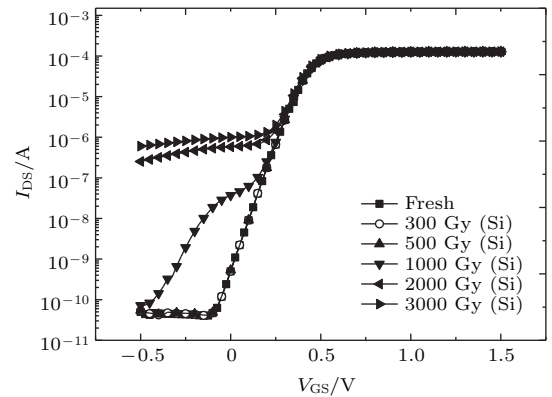


图1 NMOSFET辐照前后的转移特性曲线  
Fig. 1. Transfer characteristic curves of NMOSFET before and after irradiation.

图2所示为不同剂量率下NMOSFET关态泄漏电流随辐照及退火时间的变化, 图中的时间表示的是试验中辐照和退火时间的总和, 相对较高的两个剂量率辐照加退火的时间等于最低剂量率的辐照时间, 图中各曲线的第一个点表示各自辐照后的关态泄漏电流数值, 之后的点为不同时间退火后的电流对应值. 试验结果表明器件在低剂量率辐照下产生的关态泄漏电流大于高剂量率辐照加与低剂量率辐照时间相同的常温退火后的关态泄漏电流, 即总剂量辐射导致的NMOSFET辐射损伤并不表现为时间相关效应.

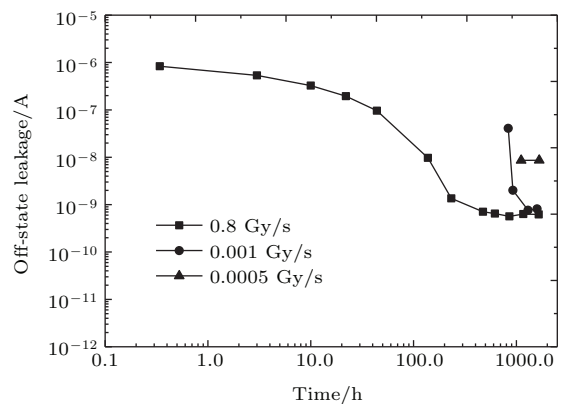


图2 不同剂量率下NMOSFET关态泄漏电流随辐照及退火时间的变化  
Fig. 2. Off-state leakage of NMOSFET changing with irradiation and anneal time under different dose rates.

图3所示为SRAM器件不同剂量率辐照下静态功耗电流随累积剂量与退火时间的变化. 如图3所示, 总剂量辐射使器件的静态功耗电流指数上升, 器件在低剂量率辐照下产生的静态功耗电流上升略强于高剂量率辐照, 在经过与低剂量率辐照时间相同的退火后, 高剂量率辐照导致的器件静态功耗电流恢复至接近于未辐照时的数值. 以上试验结果表明, 0.18 μm工艺SRAM的辐射损伤同样不表现为时间相关效应, 并出现一定的低剂量率增强. SRAM的静态功耗电流主要由存储单元中的下拉NMOSFET的关态漏电流贡献, 而辐照使NMOSFET的关态漏电流急剧上升, 进而器件的静态功耗电流随累积剂量指数上升. 也就是说, SRAM的静态功耗电流的大小反映了辐照在晶体管STI氧化物中产生氧化物陷阱电荷的数量[14-16].

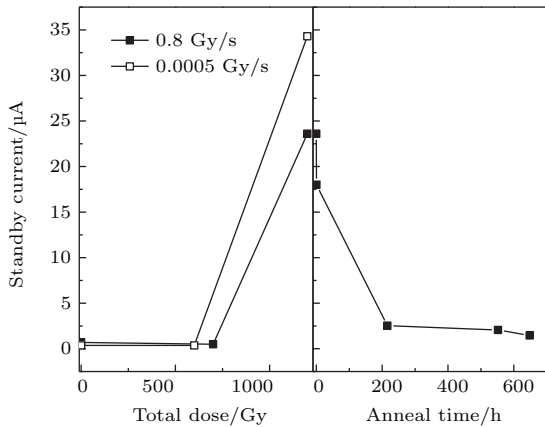


图3 不同剂量率下HM62 V8100 I静态功耗电流随辐照及退火时间的变化  
Fig. 3. Standby current of HM62 V8100 I under different dose rates.

### 4 理论分析

图4为STI电场分布的计算机辅助设计 (technology computer aided design, TCAD) 仿真结果, 其中0点表示STI的起始位置, X表示与起始点的横向(对应器件的沟道长度方向)距离, Y表示与起始点的纵向距离(图5中亦是如此). 如图4所示, 在开启状态下STI的电场呈四分之一圆周分布, 且其电场强度由上至下逐渐减小. 依据STI的电场分布TCAD仿真结果, 我们可以将STI分割为多个寄生晶体管(图5所示), 寄生晶体管栅氧厚度  $S(x)$  随着STI深度的下降逐渐增加, 且可表达为(1)式, 其中  $\alpha$  为弧度表示的STI倾角.

$$S(x) = t_{ox} + \alpha x. \quad (1)$$

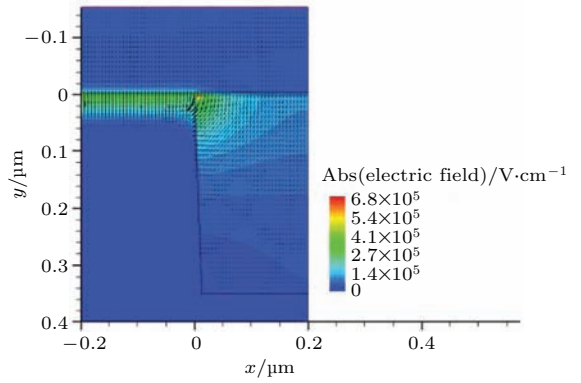


图4 (网刊彩色) STI电场分布TCAD仿真结果  
Fig. 4. (color online) Electric field distribution for STI from TCAD simulation.

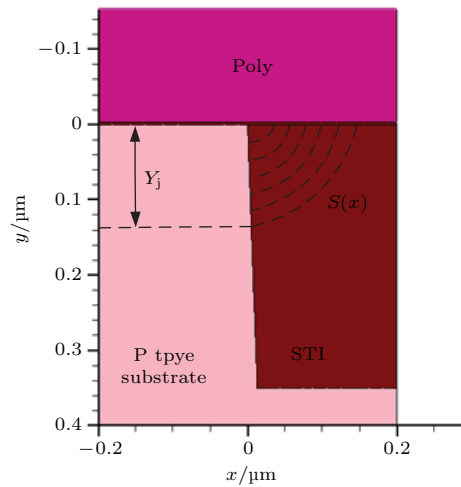


图5 STI寄生晶体管分割示意图  
Fig. 5. Schematic view of parasitic transistors formed by STI.

如图4和图5所示, 随着STI深度的下降, 寄生晶体管的栅氧厚度逐渐增大, 电场强度逐渐减小, 所以STI上半区域表现为强场薄氧化物的特性, 而下半区域表现为弱场厚氧化物的特性. 如引言所述, 强场薄氧化物在不同剂量率辐射下为时间相关效应, 弱场厚氧化物在不同剂量率辐射下为低剂量率增强效应, 所以对于超深亚微米工艺CMOS器件, STI在不同剂量率下的辐射损伤为时间相关效应与低剂量率增强效应的综合作用.

总剂量辐照在STI中产生带正电的氧化物陷阱电荷, 使寄生晶体管阈值电压负向漂移, 当阈值电压漂移过零时, 主晶体管产生关态漏电流. 如图5所示, STI可分割为多个寄生晶体管, 辐照导致的关态漏电流  $I_{par}$  可由各寄生晶体管进行积分得到, 表达为(2)式,

$$I_{par} = \frac{1}{L} \int_0^{Y_j/\sin \alpha} I_{off}(i) dx. \quad (2)$$



其中,  $Y_j$  为晶体管源漏结深,  $L$  为主晶体管的沟道长度,  $\sin \alpha$  为上文中 STI 倾角  $\alpha$  的正弦值,  $I_{\text{off}}(i)$  为辐照在第  $i$  个寄生晶体管产生的关态漏电流。

辐照在第  $i$  个寄生晶体管产生的关态漏电流表达式为

$$I_{\text{off}}(i) = u_e \frac{\varepsilon_{\text{ox}}}{t_{\text{ox}} + \alpha x} \left( -V_{\text{th}}(i) - \frac{1}{2}V_{\text{ds}} \right) V_{\text{ds}}, \quad (3)$$

其中,  $u_e$  为电子迁移率,  $\varepsilon_{\text{ox}}$  为氧化物电容率,  $V_{\text{th}}(i)$  为第  $i$  个寄生晶体管的阈值电压,  $V_{\text{ds}}$  为主晶体管的源漏电压。

第  $i$  个寄生晶体管的阈值电压  $V_{\text{th}}(i)$  可表达为

$$V_{\text{th}}(i) = V_{\text{FB}} + 2\varphi_{\text{B}} + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A (2\varphi_{\text{B}})}}{C_{\text{ox}}} - \frac{q(t_{\text{ox}} + \alpha x)}{\varepsilon_{\text{ox}}} N_{\text{ot}}, \quad (4)$$

其中,  $V_{\text{FB}}$  为晶体管平带电压,  $\varepsilon_s$  为半导体电容率,  $\varphi_{\text{B}}$  为晶体管体区本征费米能级与费米能级的电势差,  $N_A$  为体区掺杂浓度,  $C_{\text{ox}}$  为氧化物电容,  $N_{\text{ot}}$  为辐照在 STI 产生的氧化物陷阱电荷密度。

辐照导致的氧化物陷阱电荷随辐照时间的变化可表达为

$$\begin{aligned} & \frac{dN_{\text{ot}}(x, t)}{dt} \\ &= PK_g \eta_{\text{eff}}(E_{\text{ox}}, P) N_{\text{T}} \sigma(t_{\text{ox}} + \alpha x) \\ & \quad - \gamma \exp(-\beta x_0) N_{\text{ot}}(x, t) \\ & \quad - AT^2 \exp\left(-\frac{\varphi_t q}{kT}\right) N_{\text{ot}}(x, t), \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $P$  为辐射剂量率,  $K_g$  为单位剂量的电子空穴产生率,  $\eta_{\text{eff}}(E_{\text{ox}}, P)$  为与辐照剂量率、氧化物电场强度有关的电子空穴逃逸率,  $N_{\text{T}}$  为 STI 俘获空穴陷阱密度,  $x_0$  为辐射导致氧化物陷阱电荷相对于界面的距离,  $\varphi_t$  则为氧化物陷阱电荷的能级深度, 其他参数为拟合参数。

(5) 式中  $PK_g \eta_{\text{eff}}(E_{\text{ox}}, P) N_{\text{T}} \sigma(t_{\text{ox}} + \alpha x)$  部分表示单位时间内辐射产生的氧化物陷阱电荷的数量,  $\gamma \exp(-\beta x_0) N_{\text{ot}}(x, t)$  表示隧穿退火导致的氧化物陷阱电荷复合数目,  $AT^2 \exp[-(\varphi_t q)/(kT)] N_{\text{ot}}(x, t)$  则表示热激发退火导致的氧化物陷阱电荷复合数目, 该微分方程的初始条件为  $N_{\text{ot}}(x, 0) = 0$ , 即未辐照时氧化物中的缺陷电荷数目为 0。

求解微分方程 (5), 得

$$N_{\text{ot}}(x, t) = \frac{Pk_1 N_{\text{T}}}{k_2} (1 - e^{-k_2 t}),$$

$$k_1 = K_g \eta_{\text{eff}}(E_{\text{ox}}, P) \sigma(t_{\text{ox}} + \alpha x),$$

$$k_2 = \gamma \exp(-\beta x_0) + AT^2 \exp[-(\varphi_t q)/(kT)]. \quad (6)$$

将 (6) 式代入积分 (2) 式, 求解得到

$$I_{\text{par}} = \delta N_{\text{T}} / k_2 (1 - e^{-k_2 D/P}) (\theta P - \tau P^2), \quad (7)$$

其中,  $D$  为累积剂量;  $\delta, \theta, \tau$  为拟合参数。

图 6 所示为 (7) 式对不同剂量率辐射导致 0.18  $\mu\text{m}$  NMOSFET 关态漏电流的理论预测结果与试验结果的对比, 如图所示, 辐照导致关态漏电流与剂量率关系的理论预测变化趋势与试验结果一致, 即随着辐射剂量率的下降, 辐照导致的关态漏电流下降。

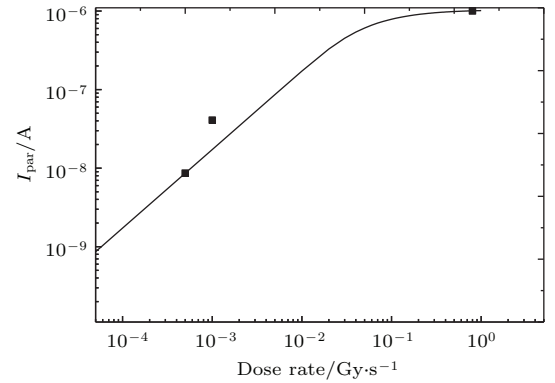


图 6 在累积剂量 3000 Gy 处辐射导致的 NMOSFET 关态漏电流试验与模拟结果对比 (图中点为试验数据, 线为数值的模拟结果)

Fig. 6. Experimental (dots) and simulated (solid line) results for radiation induced off-state leakage in NMOSFET at dose level of 3000 Gy.

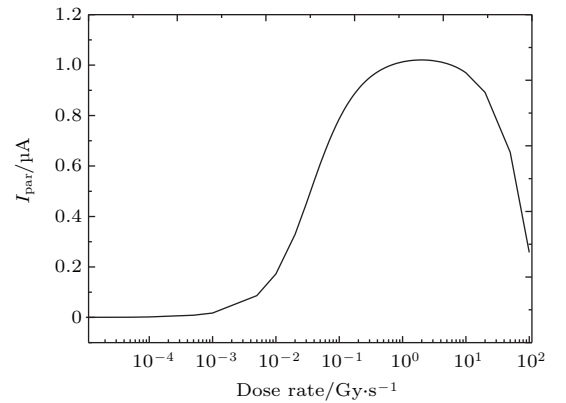


图 7 辐射导致的晶体管关态漏电流与剂量率关系的模拟结果

Fig. 7. Simulated results for radiation induced off-state leakage in NMOSFET changing with dose rates.

图 7 为相对于图 6 在更宽广剂量率范围内的理论模型预测结果, 可以看出辐照导致的关态漏电流随剂量率的下降先上升后下降, 这表明超深亚微米 CMOS 器件的剂量率效应存在两种相互竞

争的物理机理. 一方面, 由于STI的下半部分表现为低剂量率增强效应, 辐照剂量率越低, 该部分产生的氧化物陷阱电荷数量越多, 而另一方面, 随着辐照剂量率的下降, 辐照时间增加, 退火对氧化物陷阱电荷的恢复作用增强, 在两者的综合作用下, 辐照导致的晶体管关态漏电流表现为随剂量率的下降先上升后下降, 存在一个辐射损伤最强的剂量率点. 辐射损伤最强剂量率点的位置由(7)式中的各参数决定, 而这些参数反映了器件的工作电压、氧化物工艺、STI 拓扑结构等信息. 对于0.18  $\mu\text{m}$  NMOSFET 器件, 在剂量率由0.8 Gy/s下降到0.001, 0.0005 Gy/s时, 退火起主导作用, 进而其表现为关态漏电流随剂量率下降而下降. 而对于0.18  $\mu\text{m}$  SRAM 器件, 在剂量率由0.8 Gy/s下降到0.0005 Gy/s时, STI的下半部分的低剂量率增强效应起主导作用, 所以低剂量率辐照下器件的静态功耗电流大于高剂量率辐照.

试验结果表明, 无论是0.18  $\mu\text{m}$  CMOS工艺的NMOSFET还是SRAM, 其辐射损伤都不表现为时间相关效应, 即器件的低剂量率辐射损伤远大于高剂量率辐射损伤加与低剂量率辐照时间相同的退火的损伤. 高剂量率辐照后, 器件表现出很高的退火效率, 即短时间退火后, 器件的辐射损伤恢复至初值附近. 器件高剂量率辐照后的快速退火与高剂量率辐照时在氧化物中产生的空间电场密切相关. 空间电荷模型是低剂量率增强效应研究中被广泛接受的一个理论模型, 相比低剂量率辐照, 高剂量率辐照会产生更多的浅陷阱空穴, 这些浅陷阱空穴形成空间电场, 空间电场阻碍空穴及氢离子的输运, 进而高剂量率辐照下氧化物陷阱电荷及界面陷阱电荷产生较少. 高剂量辐照在氧化物中产生的空穴一方面会阻碍空穴及氢离子的输运, 另外一方面, 对于越过该阻碍的空穴, 空间电场则会促进空穴向硅-二氧化硅界面处输运, 形成氧化物陷阱电荷. 由于空间电场的作用, 高剂量率辐照产生的氧化物陷阱电荷的位置更靠近硅-二氧化硅界面, 而隧穿退火率与陷阱电荷的位置呈指数关系, 所以高剂量率辐照产生的氧化物陷阱电荷有更高的退火效率.

## 5 结 论

对0.18  $\mu\text{m}$ 工艺的NMOSFET和SRAM器件开展了高、低不同剂量率下的辐照试验研究. 结果表明辐照在STI氧化物产生的氧化物陷阱电荷的

数量并不表现为时间相关效应. 超深亚微米CMOS工艺器件的辐射损伤来源于STI, 由于STI电场由上至下逐渐减弱, 其辐射损伤表现为时间相关效应与低剂量率增强效应的相互竞争, 在两者相互竞争的作用下, 辐射导致STI损伤随剂量率的下降先上升后下降, 进而存在一个最大损伤剂量率点, 该剂量率点与STI的工艺、拓扑结构等密切相关.

## 参考文献

- [1] Enlow E W, Pease R L, Combs W, Schrimpf R D, Nowlin R N 1991 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **38** 1342
- [2] Sharma A K, Sahu K, Brashears S 1996 *Radiation Effects Data Workshop 1996, IEEE Indian Wells, USA*, 19 July, 1996 p13
- [3] Lu W, Ren D Y, Guo Q, Yu X F, Fan L, Zhang G Q, Yan R L 1998 *Chin. J. Semicond.* **19** 374 (in Chinese) [陆妩, 任迪远, 郭旗, 余学峰, 范隆, 张国强, 严荣良 1998 半导体学报 **19** 374]
- [4] Yui C C, McClure S S, Rax B G, Lehman J M, Minto T D, Wiedeman M D 2002 *Total Dose Bias Dependency and ELDRS Effects in Bipolar Linear Devices* (IEEE: Radiation Effects Data Workshop) pp131-137
- [5] Zheng Y Z 2010 *Ph. D. Dissertation* (Wulumuqi: Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [郑玉展 2010 博士学位论文 (乌鲁木齐: 中国科学院新疆理化技术研究所)]
- [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, 余学峰, 何承发 2009 物理学报 **58** 5572]
- [7] Oldham T R, McLean F B 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 483
- [8] Schroeder J E, Gingerich B L, Bechtel G R 1984 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **31** 1327
- [9] James R S, Marty R S, Daniel M F, James A F, Dodd P E, Philippe P, Veronique F C 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 1833
- [10] Steven C W, Ronald C L, Jon V O, John M H, Steven C M 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2602
- [11] Johnston A H, Swimm R T, Miyahira T F 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 3279
- [12] Ivan S E, Hugh J B, Philippe C A, Bernard G R, Harold P H, Michael L M, Ronald L P 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 2945
- [13] Liu Z L, Hu Z Y, Zhang Z X, Shao H, Chen M, Bi D W, Ning B X, Zou S C 2011 *Chin. Phys. B* **20** 070701
- [14] Zheng Q W, Yu X F, Cui J W, Guo Q, Ren D Y, Cong Z C 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 116101 (in Chinese) [郑齐文, 余学峰, 崔江维, 郭旗, 任迪远, 丛忠超 2013 物理学报 **62** 116101]
- [15] Zheng Q W, Yu X F, Cui J W, Guo Q, Ren D Y, Cong Z C, Zhou H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 106102
- [16] Zheng Q W, Cui J W, Zhou H, Yu D Z, Yu X F, Lu W, Guo Q, Ren D Y 2015 *Chin. Phys. B* **24** 106106

# Dose-rate sensitivity of deep sub-micro complementary metal oxide semiconductor process\*

Zheng Qi-Wen<sup>1)2)</sup> Cui Jiang-Wei<sup>1)2)†</sup> Wang Han-Ning<sup>4)</sup> Zhou Hang<sup>1)2)3)</sup>  
 Yu De-Zhao<sup>1)2)3)</sup> Wei Ying<sup>1)2)</sup> Su Dan-Dan<sup>1)2)3)</sup>

1) (Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environments, Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

2) (Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Material and Device, Urumqi 830011, China)

3) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

4) (Beijing Microelectronics Technology Institute, Beijing 100076, China)

( Received 3 November 2015; revised manuscript received 26 January 2016 )

## Abstract

Enhancing low dose rate sensitivity (ELDRS) in bipolar device is a major problem of liner circuit radiation hardness prediction for space application. ELDRS is usually attributed to space-charge effect. A key element is the difference in transport rate between holes and protons in SiO<sub>2</sub>. Interface-trap formation at high dose rate is reduced due to positive charge buildup in the Si/SiO<sub>2</sub> interfacial region (due to the trapping of holes and/or protons) which reduces the flow rates of subsequent holes and protons (relative to the low-dose-rate case) from the bulk of the oxide to the Si/SiO<sub>2</sub> interface. Generally speaking, the dose rate of metal oxide semiconductor (MOS) device is time dependent when annealing of radiation-induced charge is taken into account. The degradation of MOS device induced by the low dose rate irradiation is the same as that by high dose rate when annealing of radiation-induced charge is taken into account. However, radiation response of new generation MOS device is dominated by charge buildup in shallow trench isolation (STI) rather than gate oxide as older generation device. Unlike gate oxides, which are routinely grown by thermal oxidation, field oxides are produced using a wide variety of deposition techniques. As a result, they are typically thick (100 nm), soft to ionizing radiation, and electric field is far less than that of gate oxide, which is similar to the passivation layer of bipolar device and may lead to ELDRS. Therefore, dose-rate sensitivities of n-type metal oxide semiconductor field effect transistor (NMOSFET) and static random access memory (SRAM) manufactured by 0.18 μm complementary metal oxide semiconductor (CMOS) process are explored experimentally and theoretically in this paper. Radiation-induced leakages in NMOSFET and SRAM are examined each as a function of dose rate. Under the worst-case bias, the degradation of NMOSFET is more severe under the low dose rate irradiation than under the high dose rate irradiation and anneal. Moreover, radiation-induced standby current rising in SRAM is more severe under the low dose rate irradiation than under the high dose rate irradiation even when anneal is not considered. The above experimental results reveal that the dose-rate sensitivity of deep sub-micron CMOS process is not related to time-dependent effects of CMOS devices. Mathematical description of the combination between enhanced low dose-rate sensitivity and time-dependent effects as applied to radiation-induced leakage in NMOSFET is developed. It has been numerically found that non time-dependent effect of deep sub-micron CMOS device arises due to the competition between enhanced low dose-rate sensitivity in bottom of STI and time-dependent effect at the top of STI. The high dose rate irradiation is overly conservative for devices used in a low dose rate environment. The test method provides an extended room temperature anneal test to allow leakage-related parameters that exceed postirradiation specifications to return to a specified range.

**Keywords:** total ionizing dose effects, deep sub-micron, metal oxide semiconductor field effect transistor, static random access memory

**PACS:** 61.80.Ed, 61.82.Fk, 85.30.Tv, 07.85.-m

**DOI:** 10.7498/aps.65.076102

\* Project supported by the West Light Foundation of The Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. XBBS201219).

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