

# 55 nm 硅-氧化硅-氮化硅-氧化硅-硅闪存单元的 $\gamma$ 射线和 X 射线电离总剂量效应研究

曹杨<sup>1)</sup> 习凯<sup>2)</sup> 徐彦楠<sup>1)2)</sup> 李梅<sup>2)</sup> 李博<sup>2)</sup> 毕津顺<sup>1)2)</sup>† 刘明<sup>2)</sup>

1) (中国科学院大学, 北京 100049)

2) (中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

(2018年9月5日收到; 2018年12月18日收到修改稿)

基于<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 射线和10 keV X射线辐射源, 系统地研究了55 nm 硅-氧化硅-氮化硅-氧化硅-硅闪存单元的电离总剂量效应, 并特别关注其电学特性退化的规律与物理机制. 总剂量辐照引起闪存单元  $I$ - $V$  特性曲线漂移、存储窗口变小和静态电流增大等电学特性的退化现象, 并对其数据保持能力产生影响. 编程态闪存单元的  $I_d$ - $V_g$  曲线在辐照后显著负向漂移, 而擦除态负向漂移幅度较小. 对比两种射线辐照, 擦除态的  $I_d$ - $V_g$  曲线漂移方向不同. 相比于擦除态, 富含存储电子的编程态对总剂量辐照更为敏感; 且相比于<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 射线, 本文观测到了显著的 X 射线剂量增强效应. 利用 TCAD 和 Geant 4 工具, 从能带理论详细讨论了 55 nm 硅-氧化硅-氮化硅-氧化硅-硅闪存单元电离总剂量效应和损伤的物理机制, 并模拟和深入分析了 X 射线的剂量增强效应.

**关键词:** 闪存, 电荷俘获, 电离总剂量, 剂量增强

**PACS:** 85.40.-e

**DOI:** 10.7498/aps.68.20181661

## 1 引言

随着半导体器件特征尺寸的持续微缩, 传统浮栅型闪存面临严重的隧穿氧化层漏电和存储单元间的串扰等问题<sup>[1,2]</sup>, 而基于氮化硅的硅-氧化硅-氮化硅-氧化硅-硅技术 (silicon-oxide-nitride-oxide-silicon, SONOS) 可以有效抑制和解决上述瓶颈问题. SONOS 具有分立的电荷存储能力、低操作电压和更好的耐受性/保持能力, 制程简单并与互补金属氧化物半导体 (complementary-metal-oxide-semiconductor, CMOS) 工艺兼容等优势<sup>[3-6]</sup>. 其结构中富含深能级陷阱的无定形氮化硅层用来存储电子和空穴, 当单一缺陷导致的漏电路径产生时, 存储层可以保留绝大部分电荷, 从而避免存储信息的丢失及器件功能的失效<sup>[7]</sup>.

应用于空间环境的存储器件需要面对极端恶

劣的辐射环境, 各种高能带电粒子 (如电子、质子和重离子) 与射线会对器件的功能、性能和可靠性产生显著影响<sup>[8]</sup>. 通常主要关注电离总剂量效应和单粒子效应等. 电离总剂量效应会引起器件阈值电压漂移、漏电增加、噪声增加和电子迁移率降低等退化, 甚至造成器件失效<sup>[9,10]</sup>. 国内外学者已对浮栅型闪存的辐射效应开展了大量研究工作, 包括存储单元、或非门 (NOR) 和与非门 (NAND) 电路等<sup>[11-15]</sup>. Snyder 等<sup>[16]</sup>指出, 引起浮栅型闪存中辐射诱发阈值电压漂移的机制主要包括: 1) 周围氧化层中产生的电荷注入至浮栅; 2) 隧穿氧化层中的电荷俘获; 3) 浮栅中载流子的光电效应. Northrop Grumman 和 Cypress 等公司在高可靠 SONOS 闪存研制方面开展了系统性的工作<sup>[17-19]</sup>. 0.13  $\mu\text{m}$  技术节点的 SONOS 存储单元具有良好的抗总剂量辐照能力<sup>[20,21]</sup>. 得益于较宽的存储窗口, 新型三维

† 通信作者. E-mail: [bijinshun@ime.ac.cn](mailto:bijinshun@ime.ac.cn)

环栅纳米线 SONOS 闪存单元可承受 1 Mrad(Si) 的总剂量辐照 [22]. 然而, 当前国内外对纳米级 SONOS 闪存单元的辐射效应研究仍较少, 且通常基于单一辐射源, 鲜有研究不同辐射源对其电离总剂量效应影响的报道.

本文首先介绍 SONOS 闪存单元的测试结构和总剂量辐照实验及流程, 重点研究  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线源和 10 keV X 射线源对闪存单元  $I$ - $V$  特性曲线、存储窗口和静态电流的影响, 然后基于 TCAD 和 Geant 4 工具, 仿真分析和讨论 SONOS 闪存器件退化机理, 并模拟和深入分析两种射线的剂量增强效应.

## 2 器件和实验条件

测试结构为基于超低功耗 55 nm CMOS 工艺的  $2 \times 2$  位 NOR 型闪存单元微阵列, 每个闪存单元由 2 个晶体管 (2T) 结构组成, 即存储晶体管 (memory transistor, MT) 串联选择晶体管 (select transistor, ST). 图 1 给出了微阵列的原理图和闪存单元的透射电子显微镜 (transmission electron microscope, TEM) 横截面. 每个闪存单元有五个端口, 即 WLS, WL, BL, SL 和 B, 其中 WLS 和 BL 分别对应 MT 的栅极 (G) 和漏极 (D). MT 为 SONOS 型闪存器件, 其基本结构如图 1(a) 所示, ST 为 MOSFET. MT 和 ST 均为 n 型沟道晶体管, 因此在测量  $I_d$ - $V_g$  曲线时, ST 要保持强开启状态以保证闪存单元被选择.

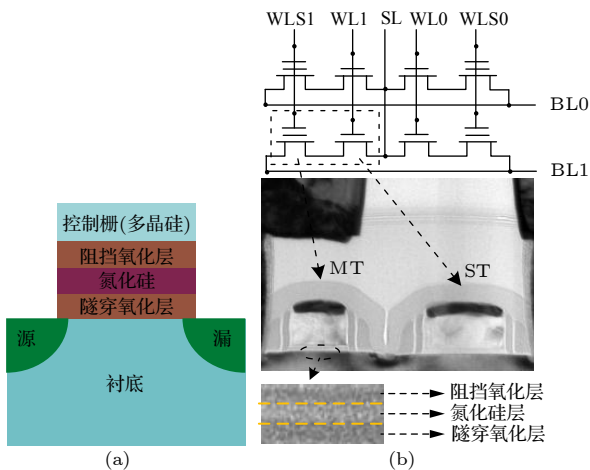


图 1 (a) SONOS 结构示意图; (b)  $2 \times 2$  位的闪存单元微阵列及其 TEM 横截面

Fig. 1. (a) Diagram of SONOS structure; (b)  $2 \times 2$  bit flash cells mini-array and the TEM cross-section.

室温下, 基于 Agilent B1500A 半导体器件分析仪对测试结构进行电性测量. 辐照前, 利用 Fowler-Nordheim 隧穿机制预先对闪存单元进行编程 (PGM) 或擦除 (ERS) 操作, 具体条件如表 1 所列. 读操作 (READ) 时, ST 开启 (对应栅压为 2.5 V), MT 漏极偏置为 0.6 V. 从 -3 V 至 3 V 扫描 MT 的栅压, 当其漏电流达到  $1 \mu\text{A}$  时, 对应的 MT 栅极电压定义为阈值电压  $V_{th}$ . 存储窗口定义为编程态和擦除态存储单元  $V_{th}$  之差.  $I_{stand-by}$  定义为  $V_{WL} = 2.5 \text{ V}$ ,  $V_d (V_{BL}) = 0.6 \text{ V}$  且栅压  $V_g (V_{WLS}) = 0 \text{ V}$  时的漏极读取电流 (通常静态电流定义为各个端口均不施加偏压时的  $I_d$ , 本测试中读取时需要施加  $V_{WL}$  以保证闪存单元被选择,  $V_{BL}$  则是测试机台固定设置).

表 1 SONOS 闪存单元的操作条件

Table 1. Operation conditions of the SONOS single flash cell.

操作	$V_{WLS}/V_g/\text{V}$	$V_{WL}/\text{V}$	$V_{BL}/V_d/\text{V}$	$V_{SL}/\text{V}$	脉冲宽度/ms
PGM	9.5	0	0	0	1.5
ERS	-9.5	0	0	0	2.5
READ	-3—3	2.5	0.6	0	—

基于  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线源的总剂量辐照实验在北京师范大学进行, 辐照剂量率为  $100 \text{ rad(Si)/s}$ , 辐照过程中未施加电学偏置, 辐照后离线移位测试电学特性; 基于 10 keV X 射线源的总剂量辐照实验在中国科学院新疆理化技术研究所进行, 辐照剂量率为  $100 \text{ rad(Si)/s}$ , 辐照后在线原位测试电学特性.

## 3 总剂量辐照实验

### 3.1 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线辐射源

图 2 给出了  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线源辐照下 SONOS 闪存单元  $I_d$ - $V_g$  曲线的变化规律. 辐照后, 编程态 SONOS 闪存单元的  $I_d$ - $V_g$  曲线负向漂移, 而擦除态对应的曲线则正向漂移. 为直观比较闪存单元的抗辐照能力, 图 3(a) 给出了总剂量辐照引起的编程态和擦除态的  $V_{th}$  漂移.  $V_{th}$  在  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线下的变化较为平缓, 辐照总剂量达到  $300 \text{ krad(Si)}$  时, 编程态  $V_{th}$  较初始减小 69.2%, 而擦除态  $V_{th}$  增大 10.0%, 存储窗口减小 27.9%. 辐照总剂量在  $100 \text{ krad(Si)}$  以下时存储窗口的变化显著, 而在  $100$ — $300 \text{ krad(Si)}$  区间的变化较平缓. 除  $V_{th}$  漂移外, 总剂量辐照也导致闪存单元的  $I_{stand-by}$  发生变化, 如图 3(b) 所

示.  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线下的  $I_{\text{stand-by}}$  变化平缓, 辐照总剂量达到 300 krad(Si) 时, 编程态和擦除态  $I_{\text{stand-by}}$  变化均小于一个数量级.

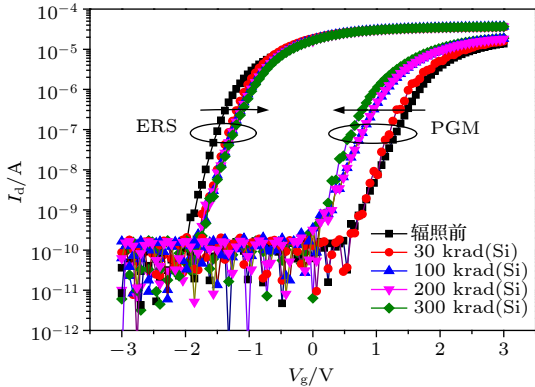


图 2  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线总剂量辐照后, 编程态和擦除态的 SONOS 闪存单元的  $I$ - $V$  特性变化规律  
Fig. 2.  $I$ - $V$  characteristics of the programmed and erased single SONOS flash cell after total ionizing dose irradiation by  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  rays.

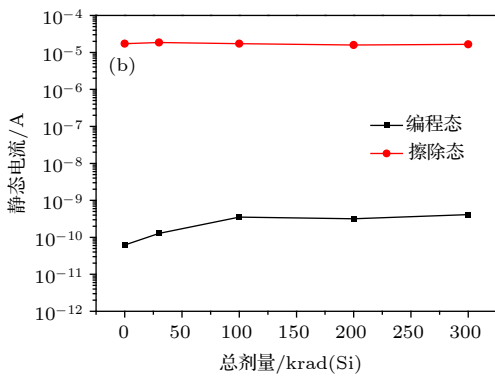
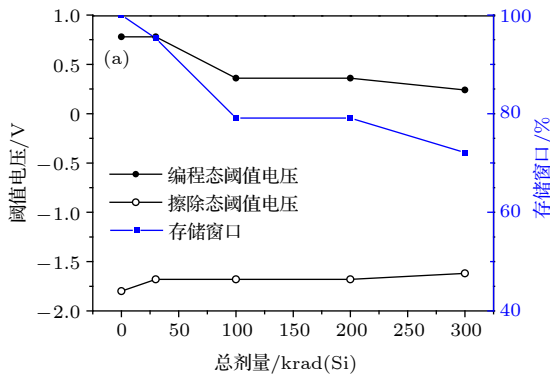


图 3 编程态和擦除态闪存单元的 (a) 阈值电压和归一化的存储窗口, 以及 (b) 静态电流随  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线总剂量辐照的变化规律  
Fig. 3. (a) Threshold voltage and normalized memory window, and (b) stand-by current of the programmed and erased single flash cell after total ionizing dose irradiation by  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  rays.

### 3.2 10 keV X 射线辐射源

图 4 给出了 10 keV X 射线源辐照下 SONOS 闪存单元  $I_{\text{d}}-V_{\text{g}}$  曲线的变化规律. 编程态闪存单元的  $I_{\text{d}}-V_{\text{g}}$  曲线在辐照后显著负向漂移, 而擦除态负向漂移幅度较小. 对比两种射线辐照, 擦除态的  $I_{\text{d}}-V_{\text{g}}$  曲线漂移方向不同. 随 10 keV X 射线辐照总剂量增至 150 krad(Si),  $V_{\text{th}}$  变化显著, 编程态  $V_{\text{th}}$  减小 248.4%, 擦除态  $V_{\text{th}}$  减小 11.1%, 存储窗口减小 60.7%, 如图 5(a) 所示. 擦除态  $I_{\text{stand-by}}$  基本无变化, 而编程态  $I_{\text{stand-by}}$  上升了 5 个数量级, 如图 5(b) 所示.

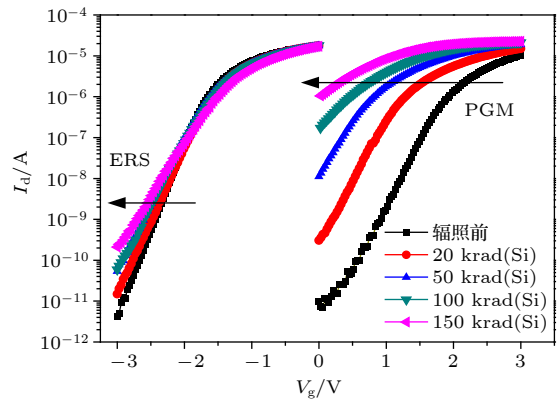


图 4 辐射源为 10 keV X 射线下编程态和擦除态闪存单元的  $I$ - $V$  特性变化规律  
Fig. 4.  $I$ - $V$  characteristics of the programmed and erased single flash cell after total ionizing dose irradiation by 10 keV X-rays.

## 4 器件退化机理分析

由上述  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线源和 10 keV X 射线源总剂量辐照后编程态和擦除态 SONOS 闪存单元的  $I$ - $V$  特性, 以及提取的  $V_{\text{th}}$  和  $I_{\text{stand-by}}$  可知: 定性而言, 不同辐射源对器件的电学特性影响趋势基本一致, 即表现为阈值电压漂移、存储窗口减小和漏电增大; 但定量而言,  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线下器件电学特性和参数退化较小, 当辐照总剂量达到 300 krad(Si) 时, 与辐照前相比, 编程态  $V_{\text{th}}$  减小 69.2%, 擦除态  $V_{\text{th}}$  增大 10.0%, 编程态和擦除态  $I_{\text{stand-by}}$  的变化均小于一个数量级. 闪存单元对 10 keV X 射线的总剂量辐照则更为敏感, 当辐照总剂量达到 150 krad(Si) 时, 与辐照前相比, 编程态  $V_{\text{th}}$  减小 248.4%, 擦除态  $V_{\text{th}}$  增大 11.1%, 擦除态  $I_{\text{stand-by}}$  无明显变化, 但编程态  $I_{\text{stand-by}}$  增大了 5 个数量级.

在测试过程中, MOS 结构的 ST 均处于强开

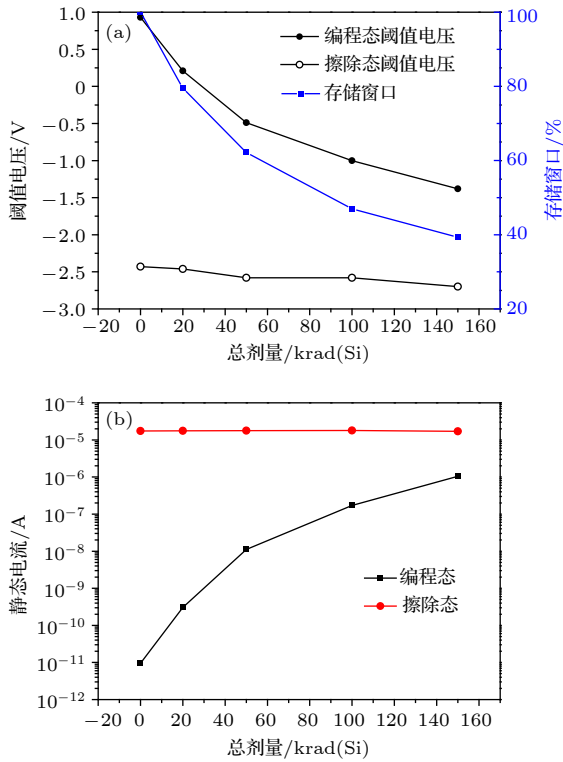


图 5 编程态和擦除态闪存单元的 (a) 阈值电压和归一化的存储窗口, 以及 (b) 静态电流随 10 keV X 射线总剂量辐照的变化规律

Fig. 5. (a) Threshold voltage and normalized memory window, and (b) stand-by current of the programmed and erased single flash cell after total ionizing dose irradiation by 10 keV X-rays.

启状态, 总剂量辐照对 ST 的影响在单元级特性研究中不明显, 因此本文着重讨论总剂量辐照对 SONOS 结构 MT 的影响. 为研究 55 nm SONOS 闪存单元电离总剂量效应的物理机理 (以编程态为例), 利用 Sentaurus TCAD 工具构建了 MT 的 SONOS 器件结构, 并获得编程态 SONOS 结构能带图, 分别如图 6 和图 7 所示. 辐照诱发编程态 SONOS 器件  $I-V$  特性退化的机制主要为图 7 所示的 5 个子物理过程:

1) 栅极材料吸收辐照能量, 氮化硅层中产生电子-空穴对. 小尺寸 SONOS 器件的隧穿氧化层和阻挡氧化层很薄 ( $< 5$  nm), 其内的辐照诱发电子-空穴对数量很少, 可忽略不计<sup>[23]</sup>;

2) 氮化硅层中存储的大量电子导致其电势较栅极和衬底低, 产生内建电场  $E_1$ ,  $E_2$ , 将 1) 产生的电子-空穴对中的电子扫出氮化硅层, 部分越过隧穿氧化层和阻挡氧化层, 进入栅极或衬底;

3) 由 1) 产生的电子-空穴对中的空穴缓慢移动到  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  界面, 被俘获形成陷阱电荷和界面态;

4) 部分电子或空穴重新被氮化硅层中的陷阱俘获, 形成电子或空穴的积累;

5) 存储在氮化硅层中的电子吸收辐照能量, 被激发到导带.

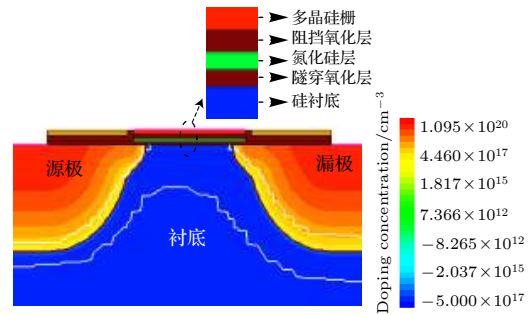


图 6 在 Sentaurus TCAD 中构建 MT 的 SONOS 结构, 其主要物理参数来自于图 1 中的 TEM 截面信息

Fig. 6. Diagram of MT's SONOS structure constructed in Sentaurus TCAD tool, with main physical parameters derived from the cross-section TEM information in Fig. 1.

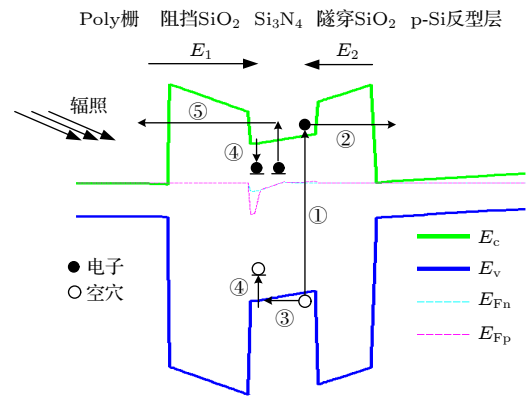


图 7 基于图 6 获得编程态 SONOS 器件能带图, 并标示出其电离总剂量效应的子物理过程

Fig. 7. Energy band diagram of programmed SONOS device based on Fig. 6, which illustrates sub-physical processes of total ionizing dose effect.

上述编程态器件退化机制中, 导致 SONOS 闪存单元的阈值电压降低、 $I-V$  特性曲线负向漂移的主要原因包括: 氮化硅层中存储电子的损失、辐照诱发的电荷积累和界面态. 擦除态器件退化机制与编程态类似, 不同之处在于存储电荷为空穴, 内建电场方向与图 7 中  $E_1$ ,  $E_2$  相反, 退化表现为阈值电压升高、 $I-V$  特性曲线正向漂移. 值得注意的是, 图 4 中 10 keV X 射线总剂量辐照后的编程态  $I-V$  特性变化比擦除态明显, 且擦除态的  $I-V_g$  曲线负向漂移. 在超薄氧化层情况下, 辐照导致的隧穿氧化层和阻挡氧化层中陷阱电荷及界面态的产生也是使器件退化的重要因素<sup>[24]</sup>. 编程态和擦除态器件

中穿过氧化层的电场方向和强度不同, 根据文献[25], 10 nm 厚度氧化层的 n 型多晶硅栅电容器中负向氧化层电场比正向产生更多的界面态, 由此可推测编程态 SONOS 器件中产生了更多的界面态, 进而显著增加了器件的亚阈值斜率 (图 8 中得以验证), 表现为退化更严重. 根据前面的理论模型,  $V_{th}$  漂移的主因是氮化硅层中存储电荷的损失和辐照诱发的电荷积累[26]. 编程态器件中存储电子的损失与辐照诱发的空穴积累相叠加, 擦除态下存储空穴的损失与后者则是相抵消, 因此两种状态下的器件  $V_{th}$  漂移程度不同; 当擦除态器件中辐照诱发的空穴积累甚至大于存储空穴的损失时, 发生图 4 中  $I-V_g$  曲线的负向漂移[6].

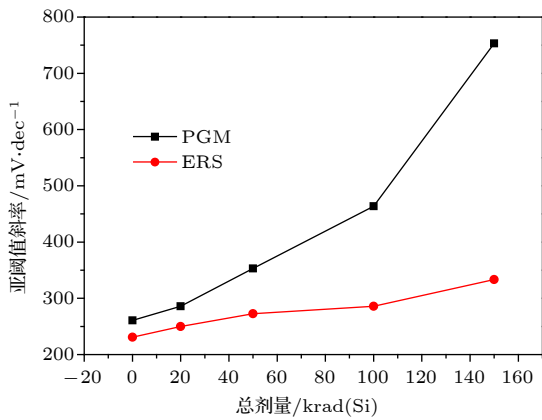


图 8 辐射源为 10 keV X 射线下编程态和擦除态闪存单元的亚阈值斜率变化规律  
Fig. 8. Sub-threshold slopes of the programmed and erased single flash cell after total ionizing dose irradiation by 10 keV X-rays.

闪存单元的另一个重要辐照退化现象是静态电流  $I_{stand-by}$  的增加. 造成此退化的原因主要包括: 1) 闪存单元的  $I-V$  特性曲线漂移导致  $I_{stand-by}$  不可避免地产生变化, 且从图 4 可以看到 X 射线下编程态  $I-V$  特性曲线漂移远超擦除态 (其机理已在上文分析), 因此在  $I_{stand-by}$  上也反映为退化比擦除态严重得多; 2) 辐照诱发了寄生电流的产生. 本器件采用浅沟道隔离工艺实现闪存单元间和阱间隔离, 此时闪存单元中的 MT 可等效成一个主晶体管和两个寄生晶体管并联[27-29], 如图 9 所示. 寄生晶体管的有效栅氧厚度相对较大, 辐照前阈值电压较大, 泄漏电流较小; 辐照后氧化层中产生正的陷阱电荷, 导致阈值电压负向漂移. 而阈值电压变量 ( $\Delta V_{th}$ ) 与氧化层厚度的平方近似成正比[30], 较大有效栅氧厚度的寄生晶体管产生显著的  $\Delta V_{th}$  负向漂移. 因此某个辐照总剂量水平下的寄生晶体管即

使在栅极零偏置下也会开启产生寄生电流, 在主晶体管的  $I-V$  特性上即表现为静态电流的一部分[27]. 寄生电流与主晶体管的导通电流相比较小, 主要反映在  $I_d-V_g$  曲线的亚阈区.

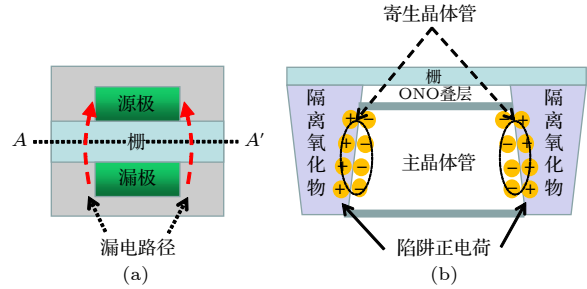


图 9 (a) 闪存单元中 MT 的布局简图和沟道边缘的漏电路径; (b) 沿虚线 A—A', MT 可等效成一个主晶体管与两个寄生晶体管的并联, MT 靠近隔离氧化物处反型层的形成导致寄生电流产生

Fig. 9. (a) MT top view with the leakage paths at the channel edges; (b) cross-section of MT along line A—A' indicates that MT can be considered as a main transistor in parallel with two parasitic transistors. The formation of the inverse layer along the isolated oxide leads to the generation of parasitic currents.

两种射线辐照剂量率均为 100 rad(Si)/s, 但对比图 3 和图 5, 10 keV X 射线总剂量辐照导致的阈值电压和静态电流退化均远超  $^{60}\text{Co}-\gamma$  射线. 光子入射到材料与靶材料发生相互作用的物理机理主要包括康普顿效应和光电效应. 高能光子辐照 ( $^{60}\text{Co}-\gamma$  射线) 中康普顿效应为主导, 光子与靶材料原子的外层电子 (自由电子) 发生弹性碰撞, 反应截面与靶材料原子序数  $Z$  的依赖关系较浅; 而低能光子辐照 (10 keV X 射线) 中则以光电效应为主导, 光子与内层电子作用, 反应截面与  $Z$  呈很强的正相关关系 ( $Z$  的 5 次方)[31-34]. 本器件在多晶硅栅上方使用了实现金属接触的高  $Z$  材料 (如 W, Cu 等), X 射线在高  $Z$  材料中产生大量二次电子, 部分次级电子进入界面 (如 Si/SiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 界面) 的灵敏区中, 因此在灵敏区产生剂量增强效应.

为研究本器件中 X 射线的剂量增强效应与高  $Z$  材料种类、厚度的关系, 利用 Geant 4 工具建立 MT 的器件模型 (如图 10)[35-37], 然后分别调整两种高  $Z$  材料的厚度参数对其进行模拟: 1) Cu 厚度为 100 nm, 其下方 W 厚度从 70 nm 增至 300 nm; 2) W 厚度为 100 nm, 其上方 Cu 厚度从 70 nm 增至 300 nm. 设置 SiN 及上下两层氧化物为灵敏体积 (SV), 辐照模拟过程中检测 SV 中的电子-空穴对数目, 设置 Cu 及 W 两层高  $Z$  材料厚度、入射射线后, 分别更改 Cu 或 W 高  $Z$  层为 Si 材料, 模拟

得到辐照下 SV 中电子数目为  $N_1$ ; 将高  $Z$  层中的 Si 材料换回为高  $Z$  材料, 重复模拟得到 SV 中电子数目  $N_2$ . 剂量增强因子为  $N_2/N_1$ , 代表了高  $Z$  材料存在情况下的剂量增强效应强度. 从图 11 可看到, W 材料的存在使得 X 射线的剂量增强效应明显, 其剂量增强因子远大于  $\gamma$  射线, 但与 W 层厚度无明显关系; Cu 材料的影响很小, 其一是因为射线在 W 层中产生的电子-空穴对密度远高于 Cu, 相当于阻隔了 Cu 对灵敏区的影响, 其二则是因为 Cu 层离器件灵敏区距离较远.

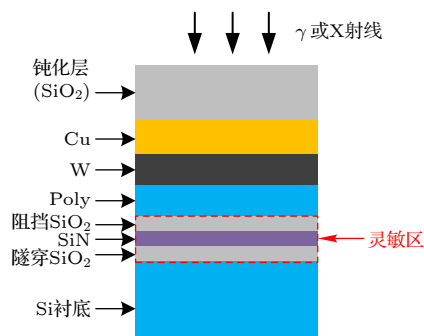


图 10 Geant 4 中建立的 MT 器件模型  
Fig. 10. MT device model established by Geant 4 tool.

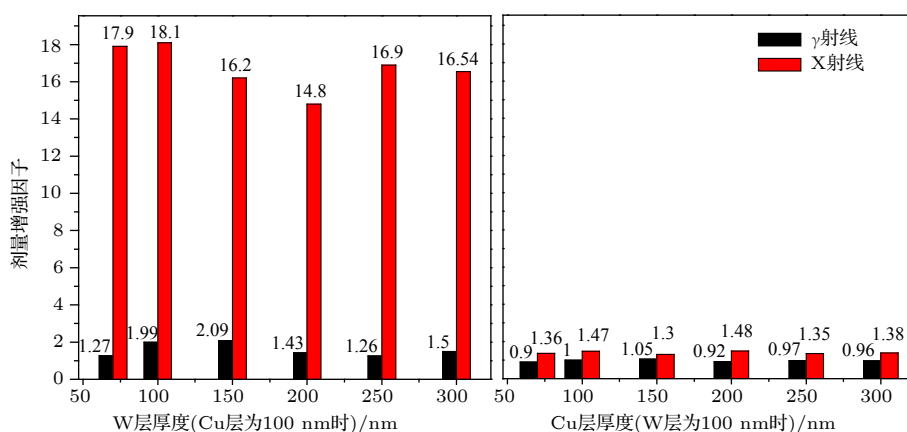


图 11 Geant 4 工具模拟高  $Z$  材料与 X 射线剂量增强效应的关系  
Fig. 11. Dose enhancement effect of X-rays on high- $Z$  materials, simulated by Geant 4 tool.

## 5 结 论

本文研究了  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线和 10 keV X 射线两种辐射源对于 55 nm SONOS 闪存单元电离总剂量效应的影响.  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线和 10 keV X 射线辐照均引起 SONOS 闪存单元阈值电压漂移、存储窗口减小和静态电流增加, 且随总剂量的增大而逐渐失去信息存储的能力. 氮化硅层中存储电荷的损失、辐照诱发的电荷积累和界面态的产生导致了阈值电压退化, 进而影响到静态电流. 静态电流变化的另一个原因是辐照诱发隔离氧化物中的净陷阱正电荷导致了漏电路径的产生. 器件中多晶硅栅上方的高  $Z$  材料 W 使得 X 射线辐照产生剂量增强效应, 导致其总剂量辐照退化较  $\gamma$  射线严重得多.

## 参考文献

[1] Lu C Y, Hsieh K Y, Liu R 2009 *Microelectron. Eng.* **86** 283  
 [2] Houdt J V 2011 *Curr. Appl. Phys.* **11** e21  
 [3] Li M, Bi J S, Xu Y N, Li B, Xi K, Wang H B, Liu J, Li J, Ji L L, Liu M 2018 *Chin. Phys. Lett.* **35** 078502  
 [4] Takeuchi H, King T J 2003 *IEEE Electr. Device Lett.* **24** 309

[5] Cellere G, Paccagnella A, Lora S, Pozza A, Tao G 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 2912  
 [6] Cellere G, Paccagnella A, Visconti A, Bonanomi M, Candelori A 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2372  
 [7] Oldham T R, Mclean F B 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 483  
 [8] Bi J S, Han Z S, Zhang E X, Mccurdy M W, Reed R A, Schrimpf R D, Fleetwood D M, Alles M L, Weller R A, Linten D, Jurczak M, Fantini A 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 4540  
 [9] Fleetwood D M 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 1706  
 [10] Wang Z, Liu C, Ma Y, Wu Z, Wang Y 2015 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **62** 527  
 [11] Bi J S, Xi K, Li B, Wang H B, Ji L L 2018 *Chin. Phys. B* **27** 098501  
 [12] Oldham T R, Chen D, Friendlich M, Carls M A, Seidleck C M, LaBel K A 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 2904  
 [13] Petrov A, Vasil'ev A, Ulanova A, Chumakov A, Nikiforov A 2014 *Central Eur. J. Phys.* **12** 725  
 [14] Duncan A R, Gadlage M J, Roach A H, Kay M J 2016 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **63** 1276  
 [15] Bagatin M, Gerardin S, Paccagnella A, Visconti A, Bonanomi M 2015 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **62** 2815  
 [16] Snyder E S, McWhorter P J, Dellin T A, Sweetman J D 1989 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **36** 2131  
 [17] Puchner H, Ruths P, Prabhakar V, Kouznetsov I, Geha S 2014 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **61** 3005  
 [18] Adams D A, Mavisz D, Murray J R, White M H 2002 *IEEE*

- Aerospace Conference Proceedings (Cat. No.01TH8542)* Big Sky, MT, USA, March 10–17, 2001 p2295
- [19] Adams D A, Smith J T, Murray J R, White M H, Wrazien S 2005 *2004 Proceedings IEEE Computational Systems Bioinformatics Conference* Stanford, CA, USA, November 17, 2004 p36
- [20] Qiao F, Yu X, Pan L, Ma H, Wu D, Xu J 2012 *19th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits* Singapore, July 2–6, 2012 p1
- [21] Bassi S, Pattanaik M 2014 *18th International Symposium on VLSI Design and Test* Coimbatore, India, July 16–18, 2014 p1
- [22] Qiao F, Pan L, Blomme P, Arreghini A, Liu L 2014 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **61** 955
- [23] Qiao F Y 2013 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [谯凤英 2013 博士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [24] Yoshii I, Hama K, Maeguchi K 1989 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **36** 2124
- [25] Li L L, Yu Z G, Xiao Z Q, Zhou X J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 098502 (in Chinese) [李蕾蕾, 于宗光, 肖志强, 周昕杰 2011 物理学报 **60** 098502]
- [26] Hu Z Y, Liu Z L, Shao H, Zhang Z X, Ning B X 2011 *Microelectron. Reliab.* **51** 1295
- [27] Ning B X, Zhang Z X, Liu Z L, Hu Z Y, Chen M 2012 *Microelectron. Reliab.* **52** 130
- [28] Liu Z L, Hu Z Y, Zhang Z X, Shao H, Ning B X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 116103 (in Chinese) [刘张李, 胡志远, 张正选, 邵华, 宁冰旭 2011 物理学报 **60** 116103]
- [29] Pei Y P, Huang R, An X, Liu W, Tian J Q 2012 *J. Appl. Phys.* **51** 1295
- [30] Barnaby H J 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3103
- [31] Chen P X, Zhou K M 1997 *Physics* **12** 725 (in Chinese) [陈盘训, 周开明 1997 物理 **12** 725]
- [32] Wu Z X, He C F, Lu W, Guo Q, Aierken A 2013 *Nucl. Technol.* **36** 060201 (in Chinese) [吴正新, 何承发, 陆妩, 郭旗, 艾尔肯·阿不列木 2013 核技术 **36** 060201]
- [33] Guo H X, Han F B, Chen Y S, Zhou H, He C H 2002 *Nucl. Technol.* **25** 811 (in Chinese) [郭红霞, 韩福斌, 陈雨生, 周辉, 贺朝会 2002 核技术 **25** 811]
- [34] Zhuo J, Huang L X, Niu S L, Zhu J H 2015 *Mod. Appl. Phys.* **6** 168 (in Chinese) [卓俊, 黄流兴, 牛胜利, 朱金辉 2015 现代应用物理 **6** 168]
- [35] Allison J, Amako K, Apostolakis J, Arce P, Asai M 2016 *Nucl. Instrum. Meth. A* **835** 186
- [36] Allison J, Amako K, Apostolakis J, Araujo H, Dubois P A 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 270
- [37] Agostinelli S, Allison J, Amako K, Apostolakis J, Araujo H 2003 *Nucl. Instrum. Meth. A* **506** 250

# Total ionizing dose effects of $\gamma$ and X-rays on 55 nm silicon-oxide-nitride-oxide-silicon single flash memory cell

Cao Yang<sup>1)</sup> Xi Kai<sup>2)</sup> Xu Yan-Nan<sup>1)2)</sup> Li Mei<sup>2)</sup>  
Li Bo<sup>2)</sup> Bi Jin-Shun<sup>1)2)</sup>† Liu Ming<sup>2)</sup>

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

2) (*Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

( Received 5 September 2018; revised manuscript received 18 December 2018 )

## Abstract

The total ionizing dose (TID) effects on 55 nm SONOS flash cell, caused by  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  ray and 10 keV X-ray radiation source, are systematically investigated in this paper. The degradation of electrical characteristics is discussed while the underlying physical mechanism is analyzed. The drift of  $I$ - $V$  characteristic curve, the degradation of memory window, and the increase of stand-by current are observed after TID irradiation separately by the two radiation sources. The data retention capability is also affected by the TID irradiation. The  $I$ - $V_g$  curve of the programmed single flash cell significantly drifts towards the negative direction after TID irradiation, while the negative drift of erased state is much slower. Referring to the erased state, the drift directions of  $I_d$ - $V_g$  curves for  $\gamma$ - and X-ray radiation source are obviously different. The physical mechanism of irradiation damage in a 55 nm SONOS single flash cell is discussed in detail by the energy band theory and TCAD simulations. The storage charge loss in silicon nitride layer, the charge accumulation, and the generation of interface states all together lead to the degradation of threshold voltage and stand-by current after TID irradiation. Another cause for the increase of stand-by current is the positive trapped charges in the isolated oxide induced by irradiation, which leads to the generation of leakage paths. Significant dose enhancement effect of X-ray irradiation is observed in this paper. Device model of memory transistor is established while the dose enhancement effect of X-rays is investigated by Geant 4 tool. The high- $Z$  materials above the polysilicon gate lead to the dose enhancement effect of X-rays' irradiation, which results in the higher degradation. The density of electron-hole pairs produced by irradiation in W layer is much higher than in Cu layer. In particular, W layer is a critical factor regardless of the thickness, which can be obviously observed in the simulation.

**Keywords:** flash, charge-trapping, total ionizing dose, dose enhancement

**PACS:** 85.40.-e

**DOI:** 10.7498/aps.68.20181661

† Corresponding author. E-mail: [bijinshun@ime.ac.cn](mailto:bijinshun@ime.ac.cn)