

串口型铁电存储器总剂量辐射损伤效应和退火特性

张兴尧¹⁾²⁾³⁾ 郭旗^{1)2)†} 陆妩¹⁾²⁾ 张孝富¹⁾²⁾³⁾ 郑齐文¹⁾²⁾³⁾崔江维¹⁾²⁾ 李豫东¹⁾²⁾ 周东¹⁾²⁾³⁾

1) (中国科学院新疆理化技术研究所, 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)

(2013年1月4日收到; 2013年4月15日收到修改稿)

对一款商用串口 I2C 型铁电存储器进行了⁶⁰Co γ 辐射和退火实验, 研究了铁电存储器的总剂量效应和退火特性. 使用了超大规模集成电路测试系统测试了铁电存储器的 DC, AC, 功能参数, 分析了辐射敏感参数在辐射和退火过程中的变化规律. 实验结果表明: 总剂量辐射在器件内产生大量氧化物陷阱电荷, 造成了铁电存储器外围控制电路 MOS 管阈值向负向漂移, 氧化物陷阱电荷引入附加电场使铁电薄膜受肖特基发射或空间电荷限制电流的作用, 产生辐射感生漏电流. 由于浅能级亚稳态的氧化物陷阱电荷数量上多于深能级氧化物陷阱电荷, 使得器件功能和辐射敏感参数在常温退火过程中快速恢复.

关键词: 铁电存储器, 总剂量辐射, 退火特性

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

DOI: 10.7498/aps.62.156107

1 引言

铁电存储器是一种新型的非易失存储器, 其随机存取数据、读写速度快、无需擦除的工作模式类似于静态随机存储器 (static random access memory, SRAM), 掉电后仍能保持数据的非易失性类似于只读存储器 (read only memory, ROM), 场效应晶体管 (metal oxide semiconductor, MOS) 与电容相结合的存储单元结构类似于动态随机存取存储器 (dynamic random access memory, DRAM). 与传统非易失型存储器比较, 铁电存储器最大的不同在存储单元的电容材料是铁电薄膜, 并具备低电压驱动、耗电量低、无电荷泵电路、擦写次数高等优点, 使之有取代电可擦可编程只读存储器 (electrically erasable programmable read-only memory, EEPROM) 的趋势. 铁电存储器利用铁电材料的自发极化特性来保持数据, 这使得保存的数据不易受空间辐射引

起的电荷波动影响, 具有优秀的抗辐射能力^[1-4]. 因此, 开展铁电存储器在辐射环境中的辐射损伤机理研究对其今后的空间应用具有重要意义.

国外对铁电存储器的核心部分铁电薄膜进行了大量辐射实验, 其中锆钛酸铅 ($\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$, PZT) 材料电容抗总剂量能力达到 0.5 MGy(Si), 总剂量累积到 0.1 MGy(Si) 时, 电滞回线才会发生明显扭曲, 抗剂量率大于 $5 \cdot 10^9$ Gy(Si)/s, 抗中子辐射能力达到 2.10^{14} n/cm²^[2], 说明该薄膜材料能够经的起⁶⁰Co γ 和中子很大的总剂量和很高剂量速率的辐射. 国外铁电存储器辐射损伤研究的实验样品主要采用商用器件, 实验测试部分 DC 和功能参数^[5,6], 认为控制电路的退化可能会促使静态电流、工作电流的上升. 预测控制电路的退化可能会强烈影响 AC 参数^[6]. 国内有多所高校进行了铁电薄膜⁶⁰Co γ 射线辐射特性研究, 研究表明其抗总剂量能力达到很高的水平^[7-9]. 国内的研究机构虽然制备出电容型或者晶体管型铁电存储原型器件, 但是总体研制

† 通讯作者. E-mail: guoqi@ms.xjb.ac.cn

还处于初始阶段. 对于铁电存储器的总剂量效应报道很少, 辐射损伤机理探讨较浅, 鲜有总剂量损伤评估方法涉及.

本文使用超大规模集成电路测试系统 Verigy 93000 测试了铁电存储器 5 项 DC 参数, 5 项 AC 参数, 2 项功能参数, 从中筛选出辐射敏感参数, 通过分析辐射敏感参数在辐射和退火中的变化规律, 验证了器件的 AC 参数受总剂量积累的影响, 探讨了总剂量辐射引起器件内部漏电流增加的原因, 研究了铁电存储器在 $^{60}\text{Co}\gamma$ 射线下的总剂量辐射损伤效应和失效机理, 将对铁电存储器的空间应用提供帮助, 并为铁电存储器总剂量损伤评估方法和抗辐射加固提供了实验依据和基础.

2 实验方法

本次实验样品采用 Ramtron 公司产的 1 兆位 (128 × 8) 串口 I2C 型铁电存储器, 型号为 FM24V10. 使用超大规模测试系统 Verigy93000 进行器件测试, 开发了基于此系统的铁电存储器程序, 程序覆盖了功能, DC, AC 参数, 包括: I_{DD} (动态电流)、 I_{SB} (静态电流)、 I_{IH} (输入管脚高电平时流入器件的漏电流)、 V_{OL1} (输出低电压, $I_{\text{OL}} = 2 \text{ mA}$)、 V_{OL2} (输出低电压, $I_{\text{OL}} = 150 \mu\text{A}$)、 T_{high} (时钟周期中高电平时间)、 T_{low} (时钟周期中低电平时间)、 $T_{\text{su:dat}}$ (数据信号建立时间)、 $T_{\text{su:sta}}$ (起始信号建立时间)、 T_{aa} (数据信号输出延迟时间).

实验辐照源采用中科院新疆理化所的水储式 $^{60}\text{Co}\gamma$ 辐射源. 辐照剂量率为 $1 \text{ Gy}(\text{Si})/\text{s}$, 辐照偏置为信号管脚接高电平. 辐照实验期间选取合适剂量点将器件取出, 进行所有地址位读取“55”模式、写入“FF”、读取“FF”、写入“00”、读取“00”、写入“55”的测试. 器件功能失效时, 结束辐照实验, 进行常温退火, 当电参数不发生显著变化时, 进行 100°C 的高温退火测试, 当参数不发生显著变化时结束实验.

3 结果和讨论

辐照过程中, 实验程序设置的 DC 参数中三项发生了明显变化, 分别是 I_{DD} , I_{SB} , I_{IH} , 另外五项 AC 参数全部发生了变化, 这八项参数都可以作为辐射敏感参数. 在辐照总剂量 $1800 \text{ Gy}(\text{Si})$ 时, 器件读写

功能失效, 表现为测试机接受不到 SDA 管脚进行读写操作时发出的应答信号, 功能失效之前, 存储信息没有发生变化. 常温退火 10 min, 器件功能恢复, 常温退火 2 h, 各辐射敏感参数恢复明显.

根据常规铁电存储器制造流程可以把存储器分为互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 电路层和铁电电容层, 前者主要起控制外围电路的作用, 后者是存储单元的核心部件, 存储数据信息^[10,11]. 在辐照过程中, 器件功能失效是一个突变的过程, 失效之前存储单元的信息没有发生变化, 说明其保留极化电荷和剩余极化都没有发生明显衰减, 电滞回线没有发生明显改变. 结合器件功能失效模式认为是辐射感生的氧化物陷阱电荷使 MOS 管阈值负漂, 引起截止的 n 型金属氧化物半导体 (negative channel metal oxide semiconductor, NMOS) 管导通、导通的 p 型金属氧化物半导体 (positive channel metal oxide semiconductor, PMOSP) 管截止, 最终导致了 CMOS 电路层中某个或是某些外围控制电路模块的性能恶化, 造成了铁电存储器的功能失效.

因为氧化物电荷在室温下就能退火, 而界面态一般在 100°C 以上才发生退火^[12], 所以铁电存储器常温退火下快速恢复的主要原因是氧化物陷阱电荷的退火. 本文使用热发射模型解释氧化物陷阱电荷的退火, 氧化物陷阱电荷激发到价带的几率与陷阱相对于 SiO_2 价带的能量成指数关系. 热发射退火以热发射前沿 $\Phi_{\text{m}}(t)$ 为特征^[13]

$$\Phi_{\text{m}}(t) = (kT/q)\ln(AT^2t), \quad (1)$$

式中 T 是绝对温度, q 是基本电荷, A 是与空间俘获截面有关的参数, k 为波尔兹曼常数, t 是时间参数. 常温退火初期, 氧化层中大量靠近界面的浅能级亚稳态俘获空穴的能量小于 Φ_{m} , 被热发射发生退火, 迅速被激发到价带, 从而造成了存储器功能和辐射敏感参数的快速恢复, 而深能级俘获空穴的能量大于 Φ_{m} 继续被俘获. 在 100°C 高温退火时, 由于温度的升高使得 Φ_{m} 也随着变大, 深能级俘获的空穴的能量小于 Φ_{m} , 深能级的氧化物陷阱电荷由于热激发而退火, 但是因为其数量较少, 所以各辐射敏感参数恢复幅度不是很明显.

I_{DD} (动态电流) 和 I_{SB} (静态电流) 的辐照响应和退火行为由图 1 给出, 而图 2 给出了信号管脚 SDA 漏电流 I_{IH} 随总剂量累积和退火时间的变化关系,

由于 I_{IH} 在百分位至个位之间变化, 所以将图 2 中参数变化平缓的部分做了局部放大处理, 使得可以看到参数在十分位和百分位之间的变化趋势. 由实验结果可见, 静态电流、动态电流、输入管脚高电

平时流入器件的漏电流随着总剂量是一个渐变的过程. 分析认为辐射感生的电流主要有三部分构成: 铁电薄膜的漏电流, n 沟道截止的泄露电流, 寄生 n 沟管的场氧漏电流.

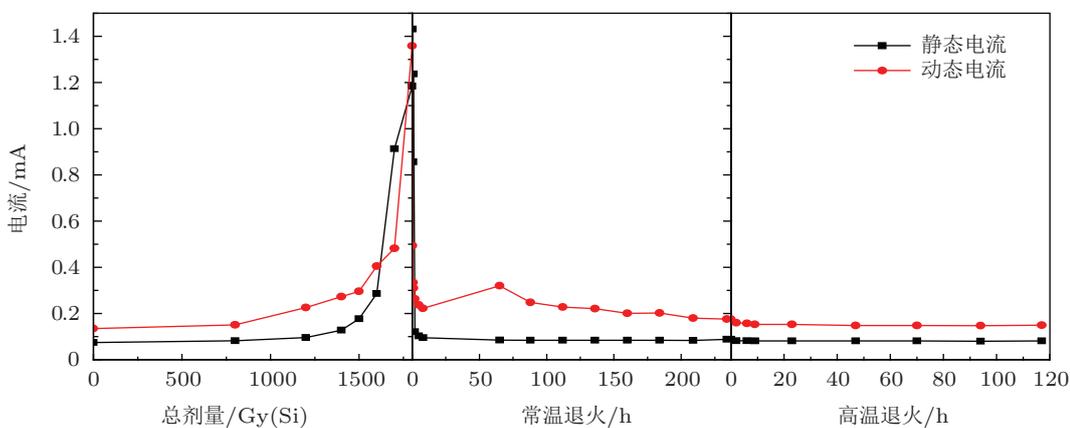


图 1 静态、动态电流与总剂量累积和退火时间的变化关系

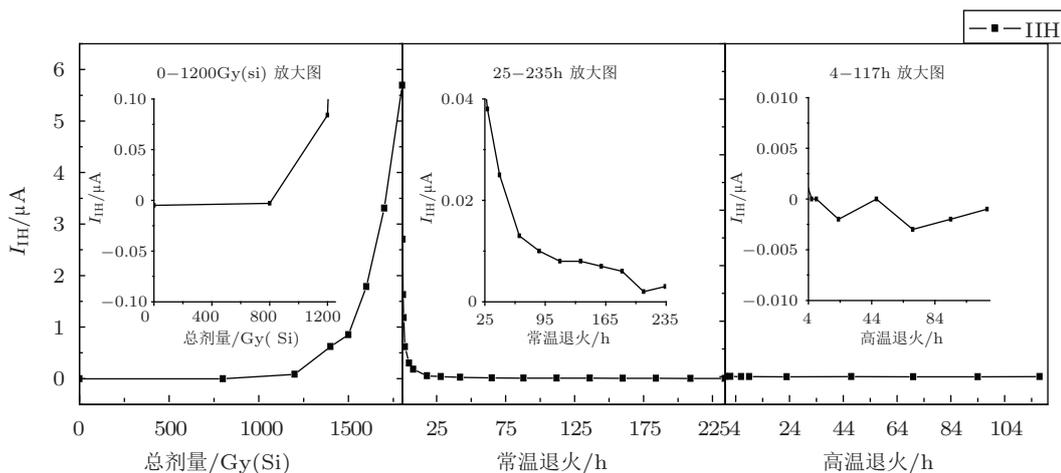


图 2 漏电流与总剂量累积和退火时间的变化关系

铁电薄膜漏电流产生的原因是: 存储器内的铁电薄膜四周使用 SiO_2 进行隔离^[10,14,15], 在较低总剂量辐照下, 离电极较近的 SiO_2 区域受边缘电场影响, 其余区域处于浮空状态, 辐射感生的电子和空穴将会发生很大程度的复合, 辐射对于铁电薄膜的影响不明显, 漏电流变化不显著. 当总剂量累积到一定程度时, SiO_2 中将产生大量的辐射感生电子和空穴. 电子会以很快的速率迁移出 SiO_2 , 在 SiO_2 中留下较多缓慢运输的空穴, 这些空穴运输到 SiO_2 -铁电薄膜的界面缺陷区, 被此处的氧空位所俘获, 晶格发生弛豫, 因而产生了氧化物陷阱电荷. 氧

化物陷阱电荷的主要缺陷源是 E' 中心, 由于 SiO_2 中电子少得多, 且 E' 中心俘获电子形成的能级较浅, 较易解束缚, 因而 E' 中心俘获空穴要远多于俘获电子, 也就是说氧化物陷阱电荷基本显示正电性. 这些氧化物陷阱正电荷在铁电薄膜四周形成了图 3 所示的附加电场. 虽然未掺杂得铁电薄膜属于典型的 p 型半导体, 但是所支配的电导是由从阴极注入的电子, 而不是空穴, 如图 4 所示^[11]. 当附加电场强度和电极电场的矢量和较低时, 铁电薄膜漏电主要是肖特基发射. 从阴极注入到铁电薄膜的电子与保留在阴极的其他电子之间存在一种吸引力, 这种

吸引镜像力和电场的净效果是将使原势垒高度 φ_1 降低一个数量 $\left(\frac{eE}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}\right)^{1/2}$, 即阴极界面处的肖特基势垒高度为

$$\varphi_2 = \varphi_1 - \left(\frac{eE}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}\right)^{1/2}, \quad (2)$$

肖特基发射电流密度为

$$J = BT^2 \exp\left(-\frac{\varphi_2}{kT}\right) \exp(\beta_1 E^{1/2}), \quad (3)$$

其中 $B = 4\pi em^*k^2/h^3$, $\beta_1 = (e/kT)(e/4\pi\epsilon_0\epsilon_r)^{1/2}$, E 为电极电场和辐射感生的附加电场的矢量和, ϵ_0 自由空间介电系数, ϵ_r 光频介电系数, m^* 电子有效质量, e 电子电量, h 普朗克常数, k 为玻尔兹曼常数. 当电子的平均自由程相对势垒的宽度较小时, (3) 式中的 BT^2 因子换为 $2e(2\pi m^*kT/h^2)^{3/2}\mu E$, μ 为电子迁移率, 则修正的肖特基发射电流密度公式为

$$J = 2e \left(\frac{2\pi m^*kT}{h^2}\right)^{3/2} \mu E \exp\left(-\frac{\varphi_2}{kT}\right) \times \exp(\beta_1 E^{1/2}). \quad (4)$$

当肖特基发射达到一定阈值后, 铁电薄膜漏电流将不被电极界面的情况限制, 而是受到铁电体中注入的空间电荷的限制. 空间电荷产生的条件是: 接触电极能使电子注入到半导体或绝缘体的导带中, 而且注入的初始速度超过了复合速度, 注入的电子填充了铁电体内的空间, 并且限制了随后电流的流动, 受空间电荷影响的区域称为空间电荷限制电流 (SCLC). 受此影响, 电流密度为莫特-古夸 (Mott-Gurney) 方程

$$J = \text{常数} \frac{V^2}{d^3}, \quad (5)$$

式中 V 为电压, d 为铁电薄膜厚度, 在实践中 (4) 式的简单形式必须被替换成

$$J = A_0 E + B_0 (E - E_0)^2, \quad (6)$$

式中 E_0 是一个陷阱能级, A_0 是一个欧姆性的体项, 而 B_0 是一与表面有关的薄膜项 [11], E 为电极电场和辐射感生的附加电场的矢量和. 由 (3), (4), (6) 式都可以定性的分析得出发射电流密度随辐射感生电场的增强而增大, 也就是说铁电薄膜因为周围的辐射感生的附加电场随总剂量的累积逐渐加强而使自身的漏电流逐渐变大.

n 沟道截止漏电流和寄生 n 沟管的场氧漏电流产生的原因分别是: n 沟管积累的辐射感生氧化物

陷阱电荷使 n 沟管的阈值电压负向漂移, 截止状态下的 n 沟道上的耗尽逐渐反型, 从而使得 n 沟道截止漏电流随总剂量的累积而增大. 寄生 n 沟管是以场氧为栅, 以正常的漏、源作为漏、源的, 厚度较大的场氧在辐射过程中感生出大量的氧化物陷阱电荷, 使寄生 n 沟管导通, 从而形成了场氧漏电通道, 漏电流逐步增大 [16].

三项电流参数在常温退火期间因为浅能级的氧化物陷阱电荷大量退火而明显恢复, 但恢复的过程略有振荡, 这是由于界面态陷阱电荷缓慢而少量的产生, 它将会引起敏感参数的退化, 退火过程还是以氧化物陷阱电荷的退火起主导作用, 因此电流参数是振荡恢复.

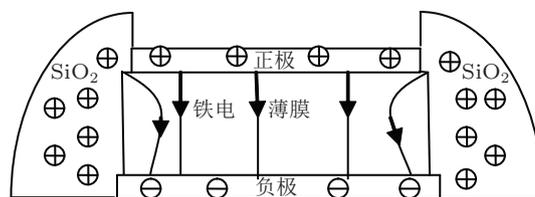


图3 氧化物正电荷引入附加电场示意图

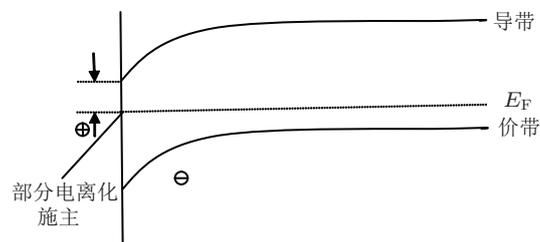


图4 能级图, 界面附近由于表面陷阱而有一 n 型反转层

表 1 反映了 AC 参数随着总剂量累积和退火的变化关系, 这些变化是铁电存储器控制电路模块内部及模块之间输入、输出、上升、下降时间的综合反映. 随着总剂量的累积而发生变化的主要原因是栅氧中的氧化物陷阱电荷造成 NMOS 和 PMOS 管的阈值向负向漂移, 亚阈摆幅变大, 直接导致了 NMOS 管开启速度变快, 关断速度变慢, PMOS 管开启速度变慢, 关断速度变快. 表 1 中前四项 AC 参数在辐照过程中逐渐变大, 可能是因为进行前四项测试所使用的电路模块中的基本单元 CMOS 反相器以输入低电平、输出高电平为主, 需要更多的 NMOS 关断和 PMOS 开启, 但是关断和开启因为阈值负漂变慢, 其 AC 参数必然提高. T_{aa} (数据信号输出延迟时间) 随总剂量累积而变小可能是因为串口

12C 铁电存储器是开漏输出, 输出模块如图 5 所示, 只有 NMOS, 没有 PMOS. 器件在完成读写操作后会输出低电平作为应答, 在输入信号为一定的标准信号前提下, 输出低电平的时间的大小主要取决于

n 沟道的开启速度. 阈值负向漂移使得 NMOS 更容易开启, 造成输出延迟时间变小. 常温退火中氧化物陷阱电荷大量退火, 阈值回漂使各项 AC 参数逐步回到初始值附近.

表 1 时间参数在辐照和退火中的变化

	总剂量 0 Gy(Si)	总剂量 1400 Gy(Si)	总剂量 1700 Gy(Si)	25 °C 退火 2 h	25 °C 退火 237 h	100 °C 退火 117 h
$T_{\text{high}}/\text{ns}$	217	229.7	244.4	223.3	216.7	216.4
T_{low}/ns	316.3	324.5	389.2	319.3	315.7	315.7
$T_{\text{su:dat}}/\text{ns}$	16	24.5	89.1	19.3	15.5	15.5
$T_{\text{su:sta}}/\text{ns}$	11.6	21.9	89.5	13.7	6.1	7.3
T_{aa}/ns	164.4	145.2	128.9	152.2	160.8	161.1

4 结论

上述研究表明, 虽然铁电材料具有很高的抗辐射性能, 但是串口型铁电存储器在电离辐射环境中仍然会出现读写功能失效、漏电流上升、AC 参数明显变化等性能退化现象. 使用了热发射模型解释了氧化物陷阱电荷的在室温下大量退火. 基于氧化物陷阱俘获正电荷, 深入讨论了存储器性能退化的机理. 认为是由于氧化物陷阱电荷引起了 CMOS 层中的 MOS 管阈值负漂, 导致了器件功能的失效和各辐射敏感参数的变化. 此外, 氧化物陷阱电荷在铁电电容层中引入了附加电场, 使辐射感生电流增加. 通过进行铁电存储器总剂量辐射损伤实验,

得出了许多有意义的结论, 为今后铁电存储器的辐射损伤机理研究和电路的抗辐射加固提供支持.

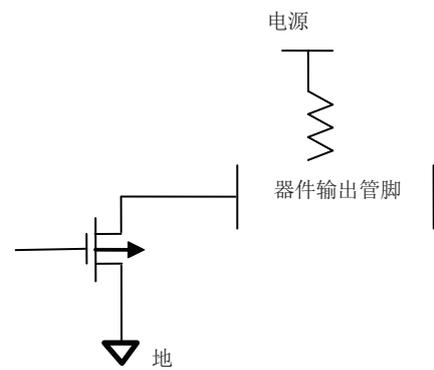


图 5 开漏输出结构

- [1] Philpy S C, Kamp D A, DeVilbiss A D, Isacson A F, Derbenwick G F 2000 *Aerospace Conference Proceedings* Big Sky, MT, March 18–25, 2000 p377
- [2] Verbeck C, Thomson C, Bagneux G P 1993 *Radiation and its Effects on Components and Systems* St Malo, September 13–16, 1993 P166
- [3] MacLeod T C, Sims W H, Varnavas K A, Sayyah R, Ho F D 2009 *Non-Volatile Memory Technology Symposium (NVMTS)* Portland OR, October 25–28, 2009 P24
- [4] Schwank J R, Nasby R D, Miller S L, Rodgers M S, Dressendorfer P V 1990 *Nuclear Science* **37** 1703
- [5] Nguyen D N, Pasadena C A 2001 *Radiation Effects Data Workshop* Vancouver BC, July 16–20, 2001 p57
- [6] Zanata M, Wrachien N, Cester A 2008 *Nuclear Science* **52** 3237
- [7] Tang C L, Cai C C, Lou L F, Lou X Q 2007 *Materials Review* **8** 33 (in Chinese) [唐重林, 柴常春, 娄利飞, 楼晓强 2007 材料导报 **8** 33]
- [8] Li Y S, Ma Y, Zhou Y C 2009 *Applied Physics Letters* **94** 42903
- [9] Lou L F, Yang Y T, Chai C C, Gao F, Tang C L 2007 *High Power Laser And Part Icicle Beams* **19** 2091 (in Chinese) [娄利飞, 杨银堂, 柴常春, 高峰, 唐重林 2007 强激光与粒子束 **19** 2091]
- [10] Cai D L 2008 *Ph.D. Dissertation* (Chendu: University of Electronic Science and technology of China) (in Chinese) [蔡道林 2008 博士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [11] Scott J F (translated by Zhu J S) 2004 *Ferroelectric memory* (1st Ed.) (Beijing: Tsinghua University Press) p78, 82 (in Chinese) [斯科特著 (朱劲松译) 2004 铁电存储器 (北京: 清华大学出版社) 第 78, 82 页]
- [12] 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, 陆旻, 任迪远, 王义元, 郭旗, 余学峰, 何承发 2009 物理学报 **58** 5572]
- [13] Mcwhorter P J, Miller S L, Miller W M 1990 *Nuclear Science* **37** 1682
- [14] Vorotilov K A, Sigov A S 2012 *Physics of the Solid State* **54** 894
- [15] Fan C, Glen F U.S. Patent 6376259B1 [2002-04-23]
- [16] Gao B, Yu X F, Ren D Y, Li Y D, Cui J W, Li M S, Li M, Wang Y Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 436 (in Chinese) [高博, 余学峰, 任迪远, 李豫东, 崔江维, 李茂顺, 李明, 王义元 2011 物理学报 **60** 436]

Serial ferroelectric memory ionizing radiation effects and annealing characteristics

Zhang Xing-Yao¹⁾²⁾³⁾ Guo Qi^{1)2)†} Lu Wu¹⁾²⁾ Zhang Xiao-Fu¹⁾²⁾³⁾
Zheng Qi-Wen¹⁾²⁾³⁾ Cui Jiang-Wei¹⁾²⁾ Li Yu-Dong¹⁾²⁾ Zhou Dong¹⁾²⁾³⁾

1) (*Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry, CAS., Urumuqi 830011, China*)

2) (*Xinjiang Key Laboratory of Electric Information Materials and Devices, Urumuqi 830011, China*)

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

(Received 4 January 2013; revised manuscript received 15 April 2013)

Abstract

Ferroelectric random memory was irradiated and annealed by $^{60}\text{Co}\gamma$ -rays, total ionizing dose (TID) failure mechanism and annealing characteristics of the device were analyzed. DC, AC and function parameters of the memory were tested in radiation and annealing by very large scale integrated circuit (VLSI) test system, the radiation-sensitive parameters were obtained through analyzing the test data. Ionizing radiation produced a large number of oxide trapped charges, leading MOS transistor threshold to the negative drift in memory peripheral control circuit. Additional electric field was introduced in the ferroelectric film, and leakage current was produced since the Schottky emission or space-charge-limited current occurred. The number of shallower levels and metastable state oxide trapped charges are more than the deep level oxide trapped charge, so that the device functions and the radiation-sensitive parameters were restored in the annealing.

Keywords: ferroelectric random memory, ionizing radiation effects, annealing characteristics

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

DOI: 10.7498/aps.62.156107

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