

铁电存储器⁶⁰Co γ 射线及电子总剂量效应研究

秦丽 郭红霞 张凤祁 盛江坤 欧阳晓平 钟向丽 丁李利 罗尹虹 张阳 琚安安

Total ionizing dose effect of ferroelectric random access memory under Co-60 gamma rays and electrons

Qin Li Guo Hong-Xia Zhang Feng-Qi Sheng Jiang-Kun Ouyang Xiao-Ping Zhong Xiang-Li Ding Li-Li Luo Yin-Hong Zhang Yang Ju An-An

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 166101 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180829

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180829>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2018/V67/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[欧空局监测器单粒子翻转能量和角度相关性](#)

Energy and angular dependence of single event upsets in ESA SEU Monitor

物理学报.2016, 65(20): 206103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.206103>

[纳米静态随机存储器质子单粒子多位翻转角度相关性研究](#)

Angular dependence of proton single event multiple-cell upsets in nanometer SRAM

物理学报.2015, 64(21): 216103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.216103>

[Cu 对用于高速相变存储器的Sb₂Te 薄膜的结构及相变的影响研究](#)

Effect of Cu on the structure and phase-change characteristics of Sb₂Te film for high-speed phase change random access memory

物理学报.2015, 64(15): 156102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.156102>

[应用于相变存储器的Cu-Ge₃Sb₂Te₅ 薄膜的结构及相变特性研究](#)

Structure and phase change in Cu-Ge₃Sb₂Te₅ films for use in phase change random access memory

物理学报.2015, 64(1): 016103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.016103>

[生长条件对脉冲激光沉积制备 ZnO:Al 薄膜光电性能的影响](#)

Influence of the growth conditions on the transparent conductive properties of ZnO:Al thin films grown by pulsed laser deposition

物理学报.2013, 62(21): 216102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.216102>

铁电存储器 ^{60}Co γ 射线及电子总剂量效应研究秦丽¹⁾ 郭红霞^{1)2)†} 张凤祁²⁾ 盛江坤²⁾ 欧阳晓平¹⁾²⁾ 钟向丽¹⁾
丁李利²⁾ 罗尹虹²⁾ 张阳¹⁾ 琚安安¹⁾

1)(湘潭大学材料科学与工程学院, 湘潭 411105)

2)(西北核技术研究所, 西安 710024)

(2018年4月26日收到; 2018年5月20日收到修改稿)

以型号为FM28 V100的铁电存储器为研究对象, 进行了 ^{60}Co γ 射线和2 MeV电子辐照实验. 研究了铁电存储器不同工作方式、不同辐射源下的总剂量辐射损伤规律, 用J-750测试部分直流参数和交流参数, 分析了存储器敏感参数的变化规律. 实验结果表明: 对动态、静态加电、静态不加电三种工作方式下的结果进行比较. 其中静态加电工作方式下产生的陷阱电荷最多, 是存储器最恶劣的工作方式; 器件的一些电参数随总剂量发生变化, 在功能失效之前部分参数已经失效; 在静态加电这种最恶劣的工作方式下, 得到 ^{60}Co γ 射线比电子造成更加严重的辐照损伤.

关键词: 铁电存储器, 总剂量效应, ^{60}Co γ 射线, 电子

PACS: 61.82.Fk, 85.30.Tv, 61.80.Ed, 61.80.Fe

DOI: 10.7498/aps.67.20180829

1 引言

航天器中的电子系统长期工作在空间辐射的环境中, 而空间辐射环境的复杂性, 导致各种各样的空间辐射效应问题. 随着人类对宇宙空间的探索和航天事业的进步, 对电子系统的存储器技术的可靠性有了更高的要求^[1,2]. 而铁电存储器(ferroelectric random access memory, FeRAM)是将铁电薄膜材料与传统的互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)工艺相结合的新型非挥发性存储器, 存储单元在写入数据后可以长时间保存, 有掉电数据不消失、低功耗、高速、长寿命等特点^[3-5]. 铁电薄膜材料具有很好的抗总剂量能力, 铁电存储器是利用铁电薄膜的极化特性来存储信息, 不受电荷影响, 具有天然抗辐射性^[6,7]. 铁电存储器是基于CMOS工艺之上, 导致抗辐射能力有所下降^[8], 但总体来说, 抗辐射能力比较高. 辐射会使部分电参数随总剂量发生明显变化, 在功能失效前率先失效, 并且存储器在实

际应用中要处于不同的环境和工作状态, 因此电离辐射造成的损伤也不相同. 研究FeRAM在不同辐射条件下的损伤机理以及辐射敏感参数在辐射中的变化规律, 对研究FeRAM的抗辐射加固具有重要的意义.

Schwank等^[9]对压电陶瓷(PZT)铁电电容进行了总剂量实验, 铁电电容的抗总剂量失效阈值为10 Mrad(Si). Shen等^[10]研究表明, 在 ^{60}Co γ 射线辐照下, 累积剂量为300 krad(Si)时FeRAM存储器功能失效, 在能量为1 MeV电子加速器下局部辐照时存储阵列损伤阈值为3 Mrad(Si), X射线下存储阵列损伤阈值为2.8—2.9 Mrad(SiO_2). 国内目前对铁电存储器的研究较少, 大多研究集中在材料级上, 娄利飞等^[11]在ELT-8电子加速器上对PZT铁电材料进行的总剂量辐照实验结果发现抗总剂量能力达到 1×10^8 rad(Si). 而对于器件级的研究, 也多是基于 ^{60}Co γ 射线辐照来研究存储器的总剂量损伤情况. GJB-2005上规定了半导体器件利用钴源来进行总剂量效应研究. 张兴尧等^[12]在 ^{60}Co γ 射线下对串口型铁电做了总剂量辐射损

† 通信作者. E-mail: guohxnint@126.com

伤和退火特性的研究. 然而空间环境中存在着大量的电子作用在电子器件上产生总剂量效应^[13]. 其中, 1 MeV 的电子作用到器件上的数量很少, 对器件造成损伤的电子能量大部分在 1 MeV 以上. 所以, 研究 2 MeV 电子对铁电总剂量的影响对其在空间环境中的应用是很有必要的.

为了了解铁电存储器不同环境、不同工作方式以及电参数随累积剂量的变化, 本文利用 ⁶⁰Co γ 射线和 2 MeV 电子对铁电存储器进行辐照实验. 通过三种工作方式对铁电存储器的辐射损伤效应, 探讨了静态加电是铁电存储器最恶劣工作方式的原因, 研究了累积剂量的变化对器件电参数退化的影响及其物理机理, 针对两种辐射环境下导致的器件性能退化和损伤情况进行了评估, 解释了电子造成辐射损伤较小的原因. 研究结果为深入了解铁电存储器的辐射效应提供了依据.

2 实验

2.1 实验样品

样品是赛普拉斯生产的型号为 FM28 V100 的铁电存储器, 金属层的厚度为 100 μm , 硅衬底的厚度为 265 μm , 存储容量为 128 k \times 8, 工作电压 3.3 V, 工艺尺寸为 130 nm.

2.2 辐照实验方法

2.2.1 ⁶⁰Co γ 辐照实验

实验在西北核研究所大钴源上进行, 剂量率为 50 rad(Si)/s. 在辐照之前写入数据 55 H (01010101), 辐照时利用在线测试系统进行测试, 测试过程中观察动、静态功耗电流及数据翻转变化, 辐照到一定剂量点时, 取出器件, 再利用 J-750 对器件进行离线测试, 直至器件的功能失效. 离线测试参数有直流参数, 包括动、静态功耗电流, 输入器件管脚漏电流, 输出高低电平、输入高低电平阈值; 交流参数具有 t_{AA} (地址信号跳变时读数据延迟时间), t_{OE} (输出使能信号跳变时读数据延迟时间), t_{CE} (片选信号跳变时读数据延迟时间), t_{WP} (写脉冲时间), t_{DW} (写数据建立时间), t_{AW} (地址信号跳变时写数据延迟时间), t_{CW} (片选写脉冲时间).

辐照过程中工作方式有: 1) 动态, 管脚接芯片正常工作时的电压; 2) 静态加电, 电源端接 3.3 V 其

他的管脚接地; 3) 静态不加电, 将多个管脚处于浮空的状态.

2.2.2 电子实验

实验在北京原子能院 2 MeV 电子加速器上进行, 实际测得的电子剂量率 16.55 krad(Si)/s. 在辐照之前写入数据 55 H, 辐照过程中, 采用静态加电工作方式辐照, 利用在线测试系统进行在线测试, 并观察动、静态功耗电流及数据翻转变化, 直至器件的功能失效.

3 实验结果与分析

3.1 ⁶⁰Co γ 射线下辐照损伤

3.1.1 在线测试时不同工作方式下辐射损伤比较

图 1 为不同工作方式下静态功耗电流 I_{sb} 随总剂量的变化关系, 可以看出动态辐照剂量大于 200 krad(Si) 时, I_{sb} 出现急剧增加, 在 320 krad(Si) 时出现功能失效, 大量数据位翻转, 数据读出全为 0. 静态加电时, 当辐照剂量在 0 krad(Si) 与 150 krad(Si) 之间时 I_{sb} 有比较小的变化, 而当辐照剂量大于 150 krad(Si) 时, I_{sb} 增加速度变快, 250 krad(Si) 时器件不能正常读写, 功能失效, 出现大量数据位翻转. 对于静态不加电, I_{sb} 几乎没什么变化, 在 320 krad(Si) 时也没出现数据位的翻转. 综上, 在三种工作方式中, 静态加电的辐射损伤最为严重.

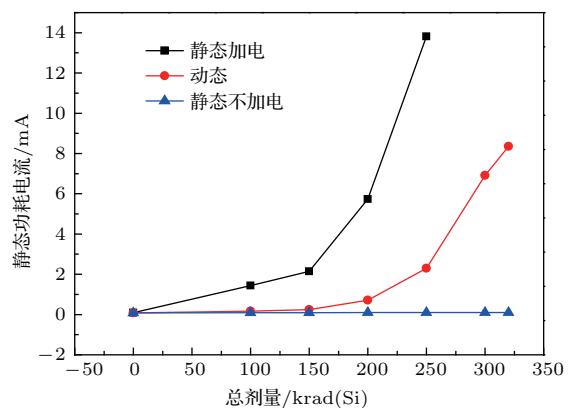


图 1 不同工作方式下 FeRAM 静态功耗电流随总剂量的变化

Fig. 1. Standby power supply current of FeRAM vs total ionizing dose under different working conditions.

对于 FeRAM 存储器件而言, 辐照时 γ 射线会入射到 SiO_2 介质材料中, 与 SiO_2 发生康普顿散射,

能量被电子得到, 脱离原子核束缚, 然后产生电子空穴对. 质量较轻的电子容易逃逸, 而质量较重的空穴输运在场氧和栅氧中产生氧化物和界面陷阱电荷, 产生的这些陷阱电荷使得FeRAM存储器件的各种电参数发生变化, 比如阈值电压的漂移、漏电流的增加等, 导致功耗电流在辐照过程中增加. 当累积剂量达到一定程度时, FeRAM存储器件存储单元的n型金属氧化物半导体 (negative channel metal oxide semiconductor, NMOS) 管会退化, 铁电电容的极化状态会受到一定的影响, 导致出现“0”到“1”, “1”到“0”的翻转, 最终使器件不能读写, 器件功能失效. 实验中在失效前后存储信息没有变化, 依旧是实验前写入的数据, 由此可见器件的功能失效是一个突变, 说明功能失效是由外围的CMOS电路性能的恶化而引起的.

电子空穴产生率 G 与复合率 r 的关系为: $G_r = G - r = Dg_0Y(E)$ [14]. (G_r 是净产生率; D 是辐射剂量率; g_0 是初始电子空穴对产生率; $Y(E)$ 是与电场有关的项, 电场越大, $Y(E)$ 越大, 最终趋于1).

不同的工作方式, FeRAM内部的电场分布也不相同. 电场有助于空穴及氢离子向界面处输运, 进而促进氧化物陷阱电荷及界面陷阱电荷的产生, 而由上式可以看出电场不同, G_r 不同, 器件的损伤程度不同. 在动态工作方式中, 电场会发生变化, 而铁电电容的剩余极化状态是靠位线上的信号, 与板线上的电压相结合, 而得到改变. 铁电薄膜的极化强度的变化, 使FeRAM器件处于读写的工作状态. 动态工作方式低电位时辐射产生的空穴电子对会有较大程度的复合, 阈值电压会出现一定程度的回漂; 在静态加电工作方式中, FeRAM存储单元与外界隔离, 主要由CMOS电路的退化引起静态电流的变化, 与动态时的变化电场相比, 静态加电辐照时存储器内部的电场是恒定的, 会使辐射过程中产生的电子空穴对分离速度加快, r 减小, 陷阱电荷的产生增加, 所以静态加电导致的辐射损伤程度要比动态时更加严重; 而对于静态不加电来说, 没有电场的作用, γ 射线引入的电子空穴复合率较大, 陷阱电荷产生的比较少, 引起的辐射损伤比上述两种工作方式要小. 所以三种工作方式中静态加电是FM28V100存储器的一个最不理想的工作方式.

3.1.2 离线测试下电参数随剂量变化关系

图2反映了功耗电流随累积剂量的变化关系, 静态、动态功耗电流随总剂量的增加有着明显变化,

特别是在累积剂量为150 krad(Si)之后. 图3反映了漏电流 I_{LI} 随着总剂量的变化关系, 在累积剂量为250 krad(Si)时存储器功能失效, 此时得到的漏电流明显超过器件手册规定的标准 $1 \mu A$, 电参数失效.

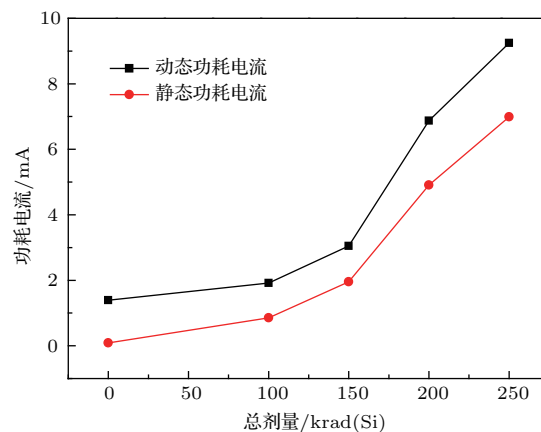


图2 FeRAM功耗电流随总剂量的变化关系

Fig. 2. Power supply current of FeRAM vs total ionizing dose.

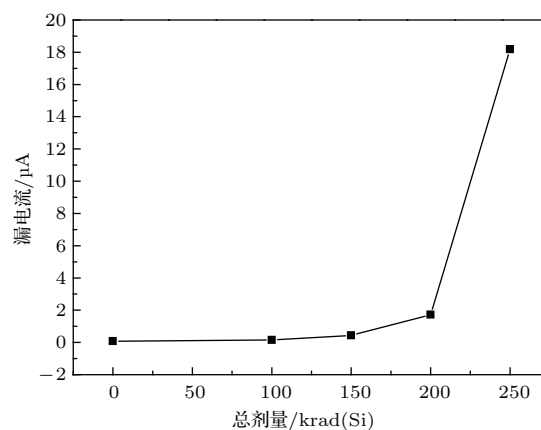


图3 FeRAM漏电流随总剂量的变化

Fig. 3. Leakage current of FeRAM vs total ionizing dose.

FeRAM存储阵列是由铁电电容和NMOS管构成, 存储器的栅氧厚度小于5 nm, 所以场氧化物中的积累电荷起着主要作用. ^{60}Co γ 产生的电离辐射损伤, 在栅氧化层和场氧化层中产生陷阱电荷, 陷阱电荷会使阈值电压漂移. 当氧化物中积累的陷阱电荷达到一定程度时, 会在源极-漏极之间生成寄生泄漏路径 (如图4所示), 从位线到板线, 中间通过串联的NMOS管和铁电电容, 形成附加电场, 产生寄生泄漏电流. 每个存储单元的泄漏电流有两个部分: 通过NMOS管的泄漏电流和铁电电容的泄漏电流. 当附加电场比较低时, 肖特基发射 (表面受限过程) 是铁电电容的主要泄漏机

理 [15], 随着铁电电容的位线上漏电流增加引起电压的增加, 肖特基势垒的电磁场降低, 因此铁电电容的泄漏电流增加. 辐射感生的氧化物陷阱电荷, 界面态陷阱电荷使阈值电压负向漂移, 使截止的N管导通, 从而漏电流随着总剂量的增加而增加. 而在CMOS外围电路中, 产生从电源经过p型金属氧化物半导体 (positive channel metal oxide semiconductor, PMOS) 和NMOS到地的泄漏路径, 使漏电流增加 [16], 导致静态功耗电流、动态功耗电流增加.

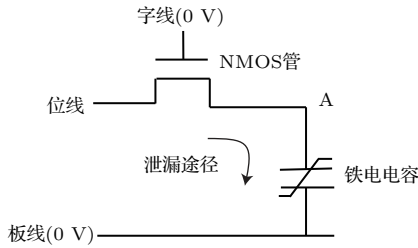


图4 FeRAM 存储单元泄漏途径示意图
Fig. 4. Sketch of leakage path of the FeRAM.

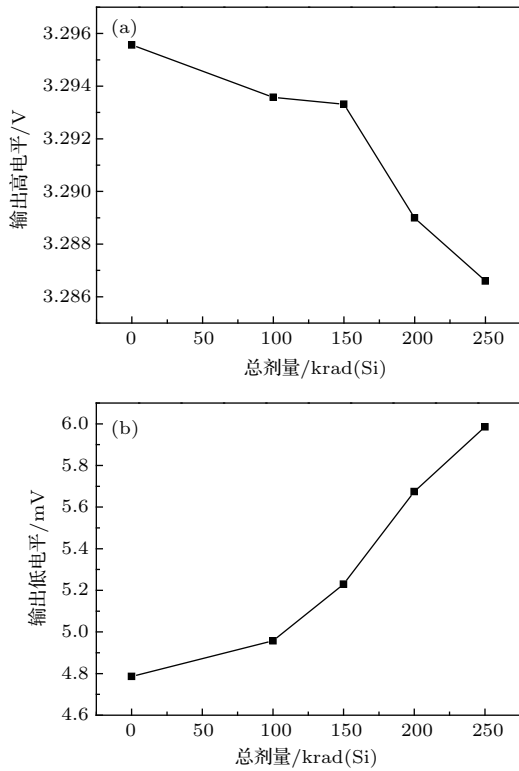


图5 FeRAM 输出高低电平随总剂量的变化关系 (a) 输出高电平; (b) 输出低电平
Fig. 5. Output high and low voltage of FeRAM vs total ionizing dose: (a) Output high voltage; (b) output low voltage.

实验时器件的输入高低电平阈值随总剂量的增加则没有发生变化, 而输出高电平、输出低电平的变化如图 5(a) 和图 5(b) 所示, 器件的输出负载能力用输出高电平 V_{OH} , 输出低电平 V_{OL} 来表

示. 实验中 V_{OH} 随着总剂量的增加而下降, V_{OL} 则增加. 由于 FeRAM 存储器的外围电路是标准的 CMOS 工艺, NMOS 管与 PMOS 管构成的反相器构成 CMOS 工艺的基本单元. 当输出为高电平时, PMOS 管导通、NMOS 管截止, 即反相器电路的工作状态简化为图 6(a), 其中 V_{IL} 为输入低电平, R_L 为负载电阻, I 为负载电流, V_{DD} 为电源电压. 由 ^{60}Co γ 造成的电离辐射会产生陷阱电荷, 阈值电压漂移, 使截止的 NMOS 管导通, PMOS 管处于饱和和导通状态. 该过程中产生关态漏电流, 上拉 PMOS 管需要对产生的关态漏电流进行一定补偿, 并且提供 I , PMOS 管的导通电压会增加, 而 V_{OH} 的值为 V_{DD} 减去 PMOS 管的导通电压, 所以随着总剂量的增加, 漏电流增加, 导致 V_{OH} 下降. 当输出电平为低电平时, PMOS 管截止、NMOS 管导通, 反相器电路的工作状态简化为图 6(b), 其中 V_{IH} 为输入高电平. 总剂量导致的关态漏电流, 以及在辐射过程中栅氧化层中产生的界面态陷阱电荷, 会使下拉 NMOS 管的能力下降, 导致 V_{OL} 上升. 当输出高电平下降到高电平阈值、输出低电平上升到低电平阈值时, 会出现翻转“0”到“1”, “1”到“0” [17,18].

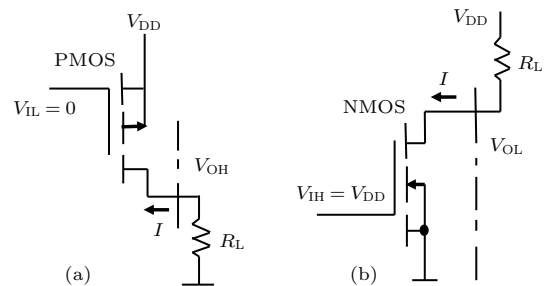


图6 输出高低电平时 CMOS 反相器的工作状态 (a) 输出高电平; (b) 输出低电平
Fig. 6. Working state of CMOS inverter under output high and low voltage: (a) Output high voltage; (b) output low voltage.

表 1 为交流参数辐照前后的变化, 实验结果表明交流参数变化不大, 所以对器件的影响较小. 具体变化原因可能是操作时序中各种信号高低电平的转变来控制器件的读写, 当输出电平由低到高时, 辐射产生的漏电流会泄漏电容的电量, 导致由低到高延时增加. 而输出电平由高到低时, 漏电流会使输出高电平变低, 且 N 沟道开启速度的快慢决定了输出低电平的时间大小, 总剂量导致阈值电压负向漂移使 NMOS 管更容易开启, 所以时间变小, 最终导致交流参数的变化.

表1 FeRAM 交流参数辐照前后的变化
Table 1. The change of AC parameters before and after radiation.

	t_{AA}/ns	t_{CE}/ns	t_{OE}/ns	t_{CW}/ns	t_{WP}/ns	t_{DW}/ns	t_{AW}/ns
0 krad(Si)	18	51	7	54	2	4	75
250 krad(Si)	18	56	10	51	2	3	72

3.2 ^{60}Co γ 及电子辐照损伤比较

如图7所示, 存储器在静态加电工作模式下, 电子辐照时动态、静态功耗电流随剂量的增加而增加, 并且电流在200 krad(Si)左右开始出现剧增, 出现错误数为34个, 在380 krad(Si)左右存储器功能失效, 无法进行正常读写. 与图1在 ^{60}Co γ 下250 krad 器件功能失效相比辐射损伤较小.

不同于 ^{60}Co γ 辐照, 电子入射到 SiO_2 中, 产生电离作用, 可在材料中产生初级电子、次级电子甚至三级电子, 由于电子(β 射线)辐射到材料上, 会在材料中形成一定的剂量深度分布, 性能的退化实际是由于电子的能量在材料中的沉积造成. 这些电子由于库仑力的作用, 会使 SiO_2 中的电子得到这部分沉积的能量, 最终脱离原子核的束缚从材料的导带激发到材料的价带, 形成电子空穴对产生陷阱电荷, 使器件的电特性发生变化, 最终器件功能失效.

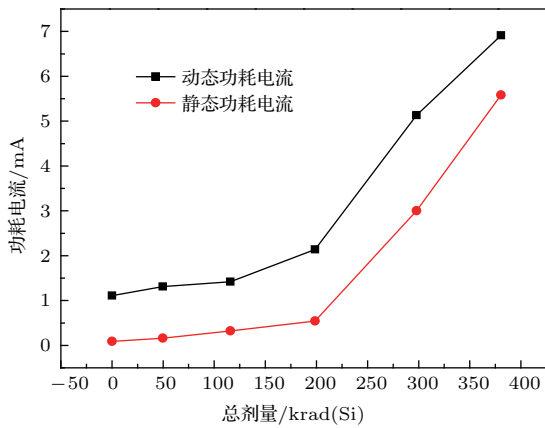


图7 电子辐照时 FeRAM 功耗电流随总剂量的变化
Fig. 7. Power supply current of FeRAM vs total ionizing dose under electron radiation.

当剂量达到一定程度时, FeRAM 存储单元的 NMOS 晶体管会退化, 铁电的极化状态会受到一定的影响, 导致出现“0”到“1”, “1”到“0”的翻转. 开始200 krad(Si)左右时翻转数为34, 而到380 krad(Si)左右时芯片读出全为0, 并且无法进行正常的读写. FeRAM 是基于 CMOS 工艺之上, 由

于铁电材料的抗总剂量能力达到 1×10^8 rad(Si), 存储器失效阈值比铁电材料小了3个数量级, 所以铁电器件的失效主要是由外围电路造成.

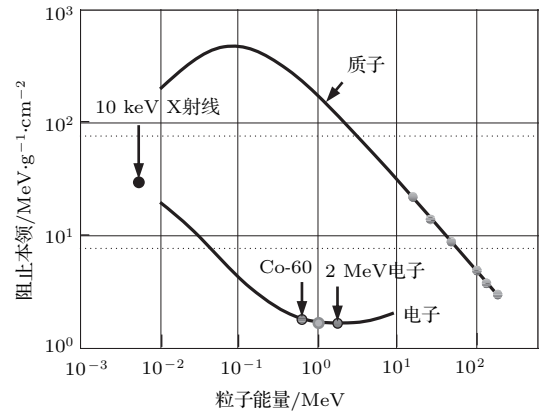


图8 不同能量的电子与质子在 SiO_2 中的阻止本领^[19]
Fig. 8. Stopping power in SiO_2 versus particle energy for electrons and protons^[19].

2 MeV 电子加速器是扫描式的加速器, 把加速器设定为定点, 由图8可知对于阻止能力而言, 电子与 ^{60}Co γ 相近, 导致产生电荷率比较相近, 但由于光子能量在50 keV和5 MeV之间时主要发生康普顿效应, 而 ^{60}Co γ 能量为1.17, 1.33 MeV 主要由于 SiO_2 康普顿散射^[20,21], 能量被电子得到, 然后产生电子空穴对, 而电子加速器产生的单能电子在入射到器件中产生电子空穴对, 由于空间中电子密度比较大, 因此与空穴的复合率也比较大, 因此电子的损伤较小; 又由于 ^{60}Co γ 有更强的穿透性芯片的封装, 金属层对它没有影响, 而芯片的封装, 金属层对电子的影响比较大, 且电子的质量比较轻, 运动的方向很容易发生变化, 运动路径较长. 综上, 与电子相比 ^{60}Co γ 会造成更加严重的损伤.

4 结 论

本文的实验和研究结果表明, 电子空穴的产生率和复合率会因电场分布的不同而有所变化. 不同于动态、静态不加电工作模式, 静态加电时 FeRAM 内部电场是恒定的, 会导致电子空穴对的净产生率

比较高,产生大量的陷阱电荷,所以静态加电工作方式导致的辐射损伤更加严重.辐照过程中随着总剂量的增加,电参数发生退化,参数退化的敏感程度不同,结合实验结果来看,静态、动态功耗电流、漏电流、输出低电平变化较大,可以作为辐射敏感参数,而输出高电平与交流参数也发生了变化但是变化幅度较小,对器件的退化影响不大.在电子辐照时由于空间中电子的密度大,电子空穴对净产生率小,又加上电子的穿透力小,器件封装对电子辐照结果有影响,所以综合而言电子的辐射损伤较小.以上结论为铁电的总剂量效应提供了参考,对研究FeRAM的抗辐射加固具有重要的意义.

参考文献

- [1] Rana S, Todd C M, Fat D H 2011 *Ferroelectrics* **413** 170
- [2] Cong Z C, Yu X F, Cui J W, Zheng Q W, Guo Q, Sun J, Wang B, Ma W Y, Ma L Y, Zhou H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 086101 (in Chinese) [丛忠超, 余学峰, 崔江维, 郑齐文, 郭旗, 孙静, 汪波, 马武英, 玛丽娅, 周航 2014 物理学报 **63** 086101]
- [3] Scott J F 2007 *Science* **315** 954
- [4] Sheikholeslami A, Gulak P G 2000 *Proc. IEEE* **88** 667
- [5] Zhou Y C, Tang M H 2009 *Mater. Rev.* **23** 1 (in Chinese) [周益春, 唐明华 2009 材料导报 **23** 1]
- [6] Zhai Y H, Li W, Li P, Hu B, Huo W R, Li J H, Gu K 2012 *Mater. Rev.* **26** 34 (in Chinese) [翟亚红, 李威, 李平, 胡滨, 霍伟荣, 李俊宏, 辜科 2012 材料导报 **26** 34]
- [7] Benedetto J M, Moore R A, Mclean F B, Brody P S 1990 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **37** 1713
- [8] Gu K, Liu J J, Li W, Liu Y, Li P 2015 *Microelectron. Reliab.* **55** 873
- [9] Schwank J R, Nasby R D, Miller S L, Rodgers M S, Dressendorfer P V 1990 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **37** 1703
- [10] Shen J Y, Li W, Zhang Y B 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 969
- [11] Lou L F, Yang Y T, Cai C C, Gao F, Tang C L 2007 *High Power Laser and Particle 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]
- [12] Zhang X Y, Guo Q, Lu W, Zhang X F, Zheng Q W, Cui J W, Li Y D, Zhou D 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 156107 (in Chinese) [张兴尧, 郭旗, 陆妩, 张孝富, 郑齐文, 崔江维, 李豫东, 周东 2013 物理学报 **62** 156107]
- [13] Schwank J R, Shaneyfelt M R, Fleetwood D M, Felix J A, Dodd P E, Paillet P, Carvois V F 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 1833
- [14] Li M S, Yu X F, Ren D Y, Guo Q, Li Y D, Gao B, Cui J W, Lan B, Fei W X, Chen R, Zhao Y 2011 *Microelectronics* **41** 128 (in Chinese) [李茂顺, 余学峰, 任迪远, 郭旗, 李豫东, 高博, 崔江维, 兰博, 费武雄, 陈睿, 赵云 2011 微电子学 **41** 128]
- [15] Scott J F (translated by Zhu J S) 2004 *Ferroelectric Memory* (Beijing: Tsinghua University Press) pp74-78 (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74—78页]
- [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** 068702 (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** 068702]
- [17] Li M, Yu X F, Xu F Y, Li M S, Gao B, Cui J W, Zhou D, Xi S B, Wang F 2012 *Atomic Energy Sci. Technol.* **46** 507 (in Chinese) [李明, 余学峰, 许发月, 李茂顺, 高博, 崔江维, 周东, 席善斌, 王飞 2012 原子能科学技术 **46** 507]
- [18] Li M, Yu X F, Xue Y G, Lu J, Cui J W, Gao B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 106103 (in Chinese) [李明, 余学峰, 薛耀国, 卢健, 崔江维, 高博 2012 物理学报 **61** 106103]
- [19] Paillet P, Schwank J, Shaneyfelt M R, Carvois V F, Jones R L, Flament O 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 2656
- [20] He B P, Yao Z B, Zhang F Q 2009 *Chin. Phys. C* **33** 436
- [21] He B P, Chen W, Wang G Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3546 (in Chinese) [何宝平, 陈伟, 王桂珍 2006 物理学报 **55** 3546]

Total ionizing dose effect of ferroelectric random access memory under Co-60 gamma rays and electrons

Qin Li¹⁾ Guo Hong-Xia^{1)2)†} Zhang Feng-Qi²⁾ Sheng Jiang-Kun²⁾ Ouyang Xiao-Ping¹⁾²⁾
Zhong Xiang-Li¹⁾ Ding Li-Li²⁾ Luo Yin-Hong²⁾ Zhang Yang¹⁾ Ju An-An¹⁾

1) (Department of Material Science and Engineer, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

2) (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

(Received 26 April 2018; revised manuscript received 20 May 2018)

Abstract

Ferroelectric random access memory (FeRAM) has superior features such as low power consumption, short write access time, low voltage, high tolerance to radiation. Data about the total ionizing dose (TID) radiation effects of FeRAM have not been rich in the literature so far. Experimental study of the ionizing radiation effect of FeRAM is carried out based on Co-60 γ rays and 2 MeV electrons. And the TID radiation damages to the FeRAM in the dynamic biased, static biased and unbiased case are studied. The direct current and alternating current parameters are tested by J-750. The test results indicate that the stored information about the memory cell has no change before failure, the ferroelectric capacitors are still able to hold the data. Accordingly, the TID failure of the FeRAM should be mainly ascribed to the poor TID hardness of the peripheral complementary metal oxide semiconductor circuits. Besides, three types of electric fields from three working conditions can result in different generation and recombination rates of electronhole pairs. For static biased case, the internal electric field in the FeRAM is constant. It can lead to high net production of the electronhole pairs and a great number of trapped charges. Hence the radiation damage in the static biased case is most serious. With the increase of the total radiation dose, the electrical parameters of FeRAM have different degradations. Part of the parameters that can be detected by J-750, may lapse before they are detected online. Standby current, operating power supply current, leakage current and output low voltage are radiationsensitive parameters of FeRAM through analyzing the test data. And, other parameters, which have slight changes, have small effect on the degradation of the device. Furthermore, the electron accelerator is used in electron irradiation experiment. By comparing the results of the two kinds of radiation tests, it is discovered that the electrons tend to cause lighter TID degradation than Co-60 γ rays because of the high density of electrons in the electron irradiation environment and low net production rate of electronhole pairs. In addition, the electrons have weaker penetration than Co-60 γ rays due to low energy. The device packaging, the upper metal layers can also influence the experimental result of electron irradiation. The above conclusions provide a reference value for the total dose effect of FeRAM and will be of great significance for studying the radiation hardening of FeRAM.

Keywords: ferroelectric random access memory, total ionizing dose effect, Co-60 γ rays, electrons

PACS: 61.82.Fk, 85.30.Tv, 61.80.Ed, 61.80.Fe

DOI: 10.7498/aps.67.20180829

† Corresponding author. E-mail: guohxnint@126.com