

# 铁电存储单元单粒子效应的仿真与研究

万义才,翟亚红,李平,辜柯,何伟

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室,四川 成都 610054)

**摘要:**运用电路仿真研究了单粒子瞬态脉冲效应对铁电存储单元存储特性的影响。结合单粒子对 MOS 器件的影响,用电流模拟单粒子对存储单元的影响且进行仿真分析。仿真结果表明脉冲电流峰值越高,时间越长,铁电存储单元越容易翻转。经分析得出了铁电电容翻转是由瞬态电流脉冲产生的单位面积电荷量决定,最后解释了翻转的原因。

**关键词:**铁电电容;铁电存储器;单粒子效应;电畴;仿真模型

**中图分类号:**TN432

**文献标识码:**A

## Simulation and Study on SEE of the Ferroelectric Memory Cell

WAN Yicai, ZHAI Yahong, LI Ping, GU Ke, HE Wei

(State Key Lab. of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** This article have studied the effects of the single event transient on the ferroelectric memory cell with circuit simulation. Combined with the effects of the single event effect(SEE) on MOS devices, the effect of single event on the memory cell has been simulated by using the current to simulate the single event. The simulation results show that the higher and longer the peak pulse current, the ferroelectric memory cell flips more easily. After analysis, the flip of ferroelectric memory cell is decided by the charge accumulation per unit area on the ferroelectric capacitor. At last, the cause of the flip has been analyzed.

**Key words:** ferroelectric capacitor; FRAM; SEE; electric domains; simulation module

### 0 引言

铁电材料以其自发极化特性应用到存储器中,带来很多优点,如快速读写,低功耗,无限次擦写,非易失性等,而其中一个显著的优点是其抗辐射性能。研究表明铁电薄膜抗中子辐射能力大于  $10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>[1-2],抗总剂量辐射能力达到 10 Mrad(Si),抗剂量率大于  $10^{11}$  rad(Si)/s[1-2],远优于同等条件下的 SiO<sub>2</sub> 材料。2002 年,美国空气动力实验室的 Schick L 等对 RAMTRON 公司的 FM1806、FM1808 以及 Hynix 公司 256k 的铁电存储器进行了单粒子翻转(SEU)及单粒子门锁(SEL)的测试,结果发现, Hynix 的 SEU 阈值为  $30 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ , SEL 阈值为  $25 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ ; Ramtron 的 SEU 阈值为  $22 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ , SEL 阈值为  $20 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ [2-3]。结果表明,集成铁电电容和 CMOS 的铁电存储器抗单粒子的能力并未达到预期的目标,故需对铁电存储器外围 CMOS 电路和存储单元抗单粒子能力进行分析。

本文通过电路仿真的方法研究了铁电存储单元抗单粒子的性能,研究了铁电存储单元翻转与单粒子瞬态电流脉冲参数的关系,并采用电畴理论对这一现象进行了分析。

### 1 仿真原理

在太空中存在大量的高能粒子,高能粒子入射到硅器件中时,粒子沿入射径迹,产生大量电子空穴对,如图 1 所示。由于电场的作用,电子空穴会分开,产生电流脉冲,这个脉冲使铁电存储单元发生翻转,或造成其他存储错误,或在组合逻辑上发生其他错误[4]。脉冲的大小由高能粒子的能量决定,不同能量产生不同脉冲高度和时间长度的电流脉冲,作用于存储单元,对铁电电容充电,若充电电荷产生的电场达到某一临界值,铁电电容发生极化反转。本文通过运用不同时间长度和脉冲高度的矩形电流脉冲来模拟这种由不同能量得到的电流脉冲。

收稿日期:2014-03-01

作者简介:万义才(1989-),男,江西人,硕士生,主要从事超大规模集成电路的研究。

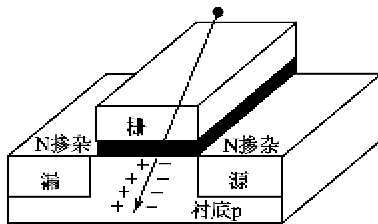


图1 单粒子对MOS器件的影响

## 2 电路设计

我们设计了敏感放大器(见图2)和2T/2C的电路结构(见图3),并进行了仿真。BL和BLN作为数据输入输出,单粒子电流脉冲通过BL作用于铁电电容 $CF_1$ 。

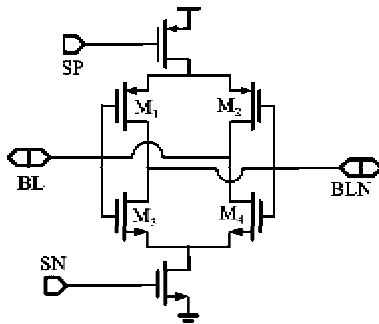


图2 敏感放大器电路

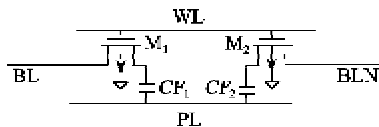


图3 2T/2C存储单元结构

## 3 仿真结果与分析

铁电存储单元是通过敏感放大器检测BL和BLN的电压差来判断铁电存储单元存储的数据是0还是1。因此可通过BL和BLN之间的电压差来判断存储单元是否发生了翻转。

分别仿真BL和BLN的电压差( $\Delta V$ ,当 $\Delta V$ 值由正值变成负值就表示存储单元发生了翻转。)与铁电电容面积( $frmc$ ),脉冲电流高度( $h$ )和脉冲电流时间长度( $t$ )的关系,仿真结果如图4~6所示。

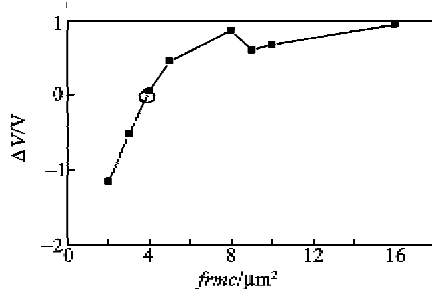
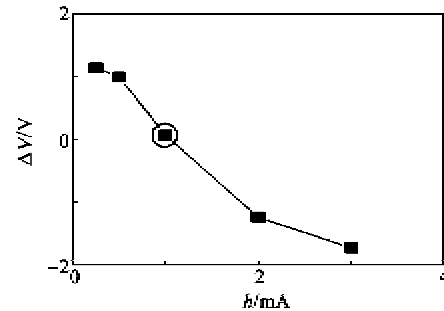
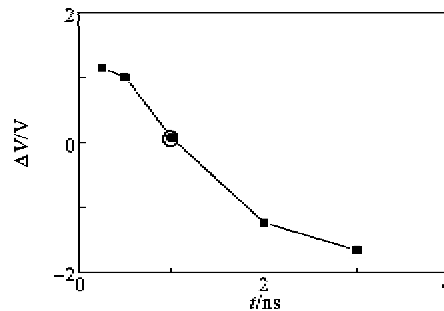


图4 电压差与铁电电容面积的关系

图5  $\Delta V$ 与 $h$ 的关系图6  $\Delta V$ 与 $t$ 的关系

由图4可见,其中寄生匹配电容为0.4 pF,瞬态电流 $i(bl)$ 时间长度 $t=1$  ns, $h=1$  mA。结果表明在相同的电流脉冲下,当 $frmc>4 \mu m^2$ , $\Delta V$ 均为正值。显然,在同样大小的电流脉冲下,铁电电容面积越大,信号电压越不易翻转。

由图5可见,瞬态电流 $i(bl)$ 时间长度 $t=1$  ns, $frmc=4 \mu m^2$ ,寄生匹配电容为0.4 pF。结果表明,在相同铁电电容面积和电流脉冲长度下,随着瞬态电流脉冲的高度的增加, $\Delta V$ 越来越小,当 $h>1$ 时, $\Delta V$ 为负值。显然,在瞬态电流时间长度一定的条件下,瞬态电流脉冲高度越小,信号电压越不易翻转。

由图6可见,瞬态电流 $i(bl)$ 脉冲高度 $h=1$  mA,铁电电容面积 $frmc=4 \mu m^2$ ,寄生匹配电容值为0.4 pF。结果表明,在相同铁电电容面积和脉冲电流长度下,随着瞬态电流脉冲的长度的增加, $\Delta V$ 越来越小,当 $t>1$  ns, $\Delta V$ 为负值。显然,在相同的铁电电容面积和瞬态电流高度下,瞬态电流时间长度越短,信号电压越不易翻转。

当瞬态电流高度与时间长度乘积( $h \times t$ )相同的情况下,信号电压的变化情况相同,表明一定面积下,铁电电容信号电压的变化由瞬态电流所产生的电荷 $Q$ 决定,存在翻转临界电荷。在仿真中,当 $Q \geq h \times t = 2 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^{-9} = 2 \times 10^{-12} = 2$  (pC)时,面积为 $4 \mu m^2$ 的铁电电容信号发生翻转,通常在硅中,97 MeV·cm<sup>2</sup>/mg的LET对应于1 pC/ $\mu m$ 的电

荷,我们可以认为大面积铁电电容单元本身具有很强的抗单粒子翻转的能力,但随着集成密度的提高,铁电电容面积越来越小,其翻转临界电荷将会更小,铁电电容将会更易翻转。

结合图4、5可以得出在铁电电容面积一定的情况下,铁电电容是否翻转是由脉冲电流在铁电电容上的电荷量决定的。

#### 4 讨论

下面运用电畴理论分析脉冲电流使铁电电容翻转的机理。

对于2T/2C存储单元(见图3)。当单粒子对 $M_1$ 起作用时,会产生一个电流脉冲,这个电流脉冲对 $CF_1$ 以及 $M_1$ 与 $CF_1$ 连接上的寄生电容充电,积累的电荷产生的电场使铁电薄膜的电畴性质发生变化,如图7所示。

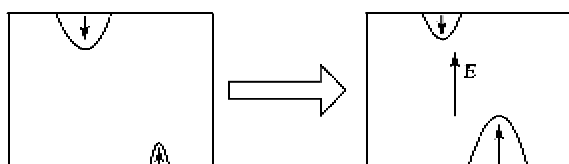


图7 电场对铁电薄膜电畴的影响

畴壁发生改变,致使 $CF_1$ 的电滞回线发生改变,存储单元发生翻转后,电滞回线的变化如图8所示。其电路结构如图3所示。图8中, $Q_{BL}$ 和 $Q_{BLN}$ 分别为 $CF_1$ 和 $CF_2$ 的加脉冲前的剩余极化电荷; $Q'_{BL}$ 和 $Q'_{BLN}$ 分别为 $CF_1$ 和 $CF_2$ 的脉冲后的剩余极化电荷, $CF_1$ 剩余极化电荷的变化就是 $CF_1$ 的极化反转的过程; $P$ 为电荷极性, $E$ 为电场。

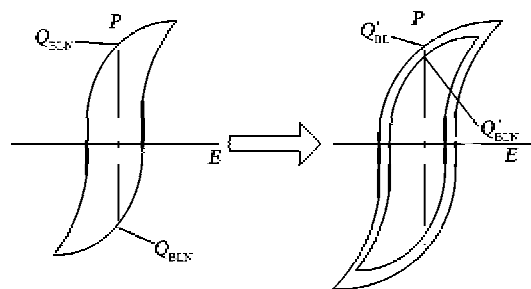


图8 电流脉冲对铁电薄膜电滞回线的影响

研究表明极化反转过程由以下几个阶段组成:新畴成核、畴的纵向长大、畴的横向张,畴的合并<sup>[5]</sup>。铁电薄膜的电畴的这些变化与加在其两端的电场密切相关<sup>[5-6]</sup>。

##### 1) 成核:

低电场时:

$$n \propto \exp(-\alpha/E) \quad (1)$$

式中: $n$ 为单位面积成核数; $\alpha$ 为激活场。

高电场时:

$$n \propto E^{1.4} \quad (2)$$

##### 2) 核长大(纵向长大速率 $v$ ):

$$v = 55 \exp\left(\frac{-180}{E}\right) \quad (3)$$

##### 3) 核扩张:

低电场时:

$$\mu = \mu_{\infty} \exp(-\delta/E) \quad (4)$$

式中: $\mu$ 为畴壁横向增长速率; $\delta$ 为激活场,其随电场升高而升高,随温度的升高而减小; $\mu_{\infty}$ 为电场无穷大的畴壁速率。

高电场时:

$$\mu \propto E^{1.4} \quad (5)$$

电畴横向扩张是由紧贴畴壁的区域成核和核的长大造成的。畴核的变化随着电场的增大而增大,由于单粒子效应产生的电流脉冲对铁电电容充电,铁电电容外加电场在某一方面增强,会改变铁电薄膜的电畴性质,改变铁电电容的极化电荷,甚至发生极化反转,改变铁电存储单元存储的信息。

#### 5 结束语

本文通过电路仿真的方法,仿真了单粒子瞬态脉冲效应对铁电存储单元存储特性的影响,仿真结果表明单粒子产生的瞬态电流脉冲将使铁电电容存储状态发生反转,脉冲电流峰值越高,时间越长,铁电存储单元越易翻转。分析结果表明,铁电电容翻转由瞬态电流脉冲产生的单位面积电荷量所决定。

#### 参考文献:

- [1] 刘斌. BNT铁电薄膜的中子辐射效应[D]. 湘潭:湘潭大学,2012.
- [2] 翟亚红. 铁电存储器设计与工艺研究[D]. 成都:电子科技大学,2005.
- [3] SCHEICK L, GUERTIN S, NGUYEN D N. Evaluation of FeRAM memories for space applications[J]. Radiation Effects Data Workshop, 2000;61-63.
- [4] SHUNKOV V E, GORBUNOV M S, VASILEGIN B V, et al. Parasitic bipolar effect in modern SOI CMOS technologies[J]. Micro and Nanoelectronics, 2008, 7025;702516.
- [5] 符春林. 铁电薄膜材料及其应用[M]. 北京:科学出版社,2009;122-129.
- [6] SCOTT J F. Applications of modern ferroelectrics[J]. Science, 2007, 315(5814): 954-959.