

# 不同辐射剂量率下 CMOS 器件的电离辐射性能

张正选<sup>1,2</sup> 罗晋生<sup>1</sup> 袁仁峰<sup>2</sup> 何宝平<sup>2</sup> 姜景和<sup>2</sup>

(1 西安交通大学微电子所 西安 710049)

(2 西北核技术研究所 西安 710024)

**摘要** 对加固 CMOS 器件在两种辐射剂量率下进行辐照实验,研究了 MOSFET 阈值电压及 CMOS 倒相器转换电压  $V_{in}$ 、开门电压  $V_{on}$ 、关门电压  $V_{off}$  等参数随辐射剂量及辐射剂量率的变化关系规律,对实验结果进行了分析讨论

PACC: 6180; EEACC: 2570D

## 1 引言

$\gamma$  辐射可在  $SiO_2$  和  $SiO_2/Si$  界面感生新的氧化物陷阱电荷及界面陷阱电荷,这些辐射感生电荷是 MOS 器件性能退化的主要原因,辐射感生的这两种电荷的多少受  $SiO_2$  栅介质的制备工艺及厚度,辐射时 MOS 器件所加偏置电压的大小,辐射总剂量及辐射剂量率等因数的影响<sup>[1~4]</sup>。本文对加固型 CMOS 器件在两种辐射剂量率下,辐射感生的氧化物陷阱电荷及界面电荷依赖与辐射剂量率的变化关系进行了研究,对 MOS 器件阈值电压及 CMOS 倒相器的转换电压随辐射剂量率和辐射剂量的变化关系也进行了研究,可为进一步提高 CMOS 器件的抗电离辐射能力提供参考

## 2 辐照实验和参数测量

实验所用样品为西安微电子技术研究所用 CMOS 工艺生产的加固型 N 4007 集成电路,其中 NMOSFET:  $W/L = 70, L = 5\mu m$ , PMOSFET:  $W/L = 140, L = 5\mu m$ , 栅氧化层厚度为 50nm, 氧化工艺为 900 干氧氧化, 试验样品为同一批次样品

### 2.1 辐射实验

辐射实验是在西北核技术研究所辐照中心的  $^{60}Co$   $\gamma$  射线辐射装置上进行的,辐射剂量率分别为  $20rad(Si)/s$  和  $100rad(Si)/s$  两种,辐射剂量率是通过  $CaF_2: Mn$  热释光剂量片和

张正选 男, 1966 年出生, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事 MOS 器件的电离辐射效应及其加固技术方面的研究工作

罗晋生 男, 教授, 博士指导教师, 主要从事半导体与微电子学方面教学科研工作

1998-04-15 收到, 1998-09-14 定稿

PHLIP 剂量仪测量确定的。辐射时样品按美国军标 MIL-M-38510 的最劣辐射偏置规定将 NMOSFET 和 PMOSFET 连接成 CMOS 倒相器与 CMOS 倒相器一同进行辐射实验。将输入端与电源端共同连接在 5V 电源上, 这样保证了 NMOSFET 处于导通状态而 PMOSFET 处于截止状态, 使得这两种器件都处于最劣辐射状态。对于相同的辐射剂量率选择 3 个样品进行辐射实验。辐射采用稳态辐射, 当辐射到一定的辐射总剂量时, 将辐射器件移走, 进行参数测量。

## 2.2 器件参数测量

器件的参数测量是在以 HP4140B 为主的半导体器件自动参数测量系统上完成的。对辐照的 MOSFET 器件的亚阈  $I-V$  曲线进行测量, 对 CMOS 倒相器的  $V_i-V_o$  传输曲线进行测量。所有的数据采集是在辐照完成后 20min 内进行的。

# 3 MOS 器件电离辐射敏感参数

## 3.1 MOS 器件的阈值电压

电离辐射可在 MOS 器件的栅介质引入辐射感生氧化物陷阱电荷及界面陷阱电荷。这些辐射感生电荷将会引起 MOS 器件的阈值电压的变化。我们可以通过亚阈分离技术<sup>[5]</sup>将辐射引起阈值电压的变化分离为氧化物陷阱电荷和界面电荷引起的变化之和, 即:

$$\Delta V_{th} = \Delta V_{ot} + \Delta V_{it} \quad (1)$$

对于 NMOSFET 和 PMOSFET, 辐射感生的氧化物陷阱电荷为正电荷, 从而引起阈值电压向负电压方向漂移。对于 NMOSFET, 由于辐射感生的界面陷阱电荷只有受主态起作用而引起阈值电压向正电压方向漂移。对于 PMOSFET, 由于辐射感生的界面陷阱电荷只有施主态起作用而引起阈值电压向负电压方向漂移。

## 3.2 CMOS 倒相器的转换电压

CMOS 倒相器的输出高低电平的转换电压是衡量 CMOS 倒相器的重要参数。CMOS 倒相器的转换电压是由组成 CMOS 器件的 NMOSFET 和 PMOSFET 的阈值电压及它们工艺和版图等参数决定的<sup>[6]</sup>:

$$V_{tr} = \frac{V_{dd} + V_{tp} + V_{tn} \left( \frac{K_n}{K_p} \right)^{\frac{1}{2}}}{1 + \left( \frac{K_n}{K_p} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

其中  $V_{dd}$  为电源电压;  $V_{tn}$  为 NMOSFET 阈值电压;  $V_{tp}$  为 PMOSFET 阈值电压;  $K_n/K_p$  为由版图设计和制作工艺决定的常数。由于辐射感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷的影响, CMOS 倒相器的转换电压也会发生变化。

# 4 实验结果及讨论

## 4.1 MOSFET 的亚阈 $I-V$ 曲线

图 1(a) 和 (b) 分别给出了两种辐射剂量率下, PMOSFET 在不同辐射剂量下的亚阈  $I-V$  曲线。经过一定辐射总剂量, 辐射将会在  $SiO_2$  和  $SiO_2/Si$  界面感生新的氧化物陷阱电荷及

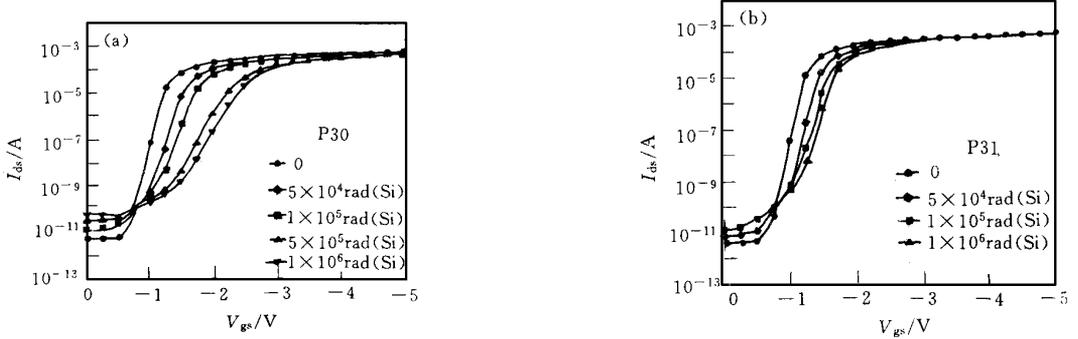


图 1 不同辐射剂量时 PMOSFET 的亚阈  $I$ - $V$  曲线  
 (a) 20rad(Si)/s, (b) 100rad(Si)/s

界面陷阱电荷 这些电荷将会引起MOS 器件的亚阈曲线的变化 从图中可以观察到: 随着辐射剂量的增加, PMOSFET 的亚阈曲线都向负电压方向漂移. 其亚阈斜率(单位: mV/decade)也在减小 对于NMOSFET 也有同样的结果, 从图中可以观察到: 辐射引起的亚阈  $I$ - $V$  曲线的变化还与辐射剂量率有关

### 4.2 MOSFET 的阈值电压

MOSFET 的阈值电压是表征MOS 器件性能的重要参数 辐射感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷将会引起MOS 器件的阈值电压的变化 图 2 表示NMOSFET 阈值电压的漂移量  $\Delta V_{th}$  及氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷引起的电压漂移量 ( $\Delta V_{ot}$ ,  $\Delta V_{it}$ ) 随辐射剂量的变化关系 从图 2 中我们可以观察: NMOSFET 的阈值电压的漂移量随着辐射剂量的增加而增加 由亚阈分离技术分离的辐射感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷对电压的漂

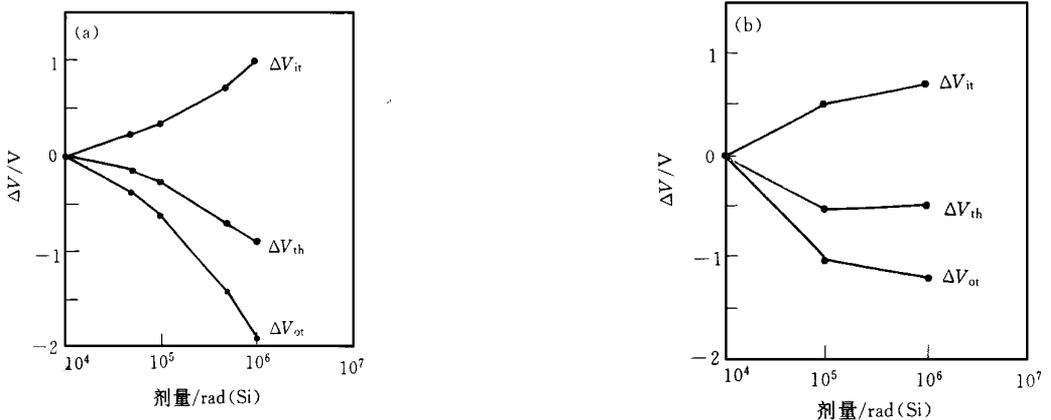


图 2 NMOSFET 阈值电压的漂移量及氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷引起的电压漂移量随辐射剂量的变化关系  
 (a) 20rad(Si)/s, (b) 100rad(Si)/s

移量也随着辐射剂量的增加而增加 对比图 2 (a) 和 (b), 在同样的辐射剂量下, 辐射感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷引起的电压漂移量在低辐射剂量率下的要比高辐射剂量率下要大 这与氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷的产生的过程相关 这一结果可以用空穴输运

模型来解释<sup>[7-9]</sup>, 即连续随机走模型(CTRW). 图 2(b) 中在总剂量  $5 \times 10^5 \text{ rad(Si)} \sim 1 \times 10^6 \text{ rad(Si)}$  时, 阈值电压的变化随着辐射剂量的增加趋于饱和即出现阈值电压的“回弹”现象. 图 3 给出了 PMOSFET 阈值电压的漂移量及氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷引起的电压漂移量随辐射剂量的变化关系. 从该图中我们可以看到 PMOSFET 的阈值电压的漂移量随着辐射剂量的增加而增加. 在同样的辐射剂量下, 随着辐射剂量率的增加而增加.

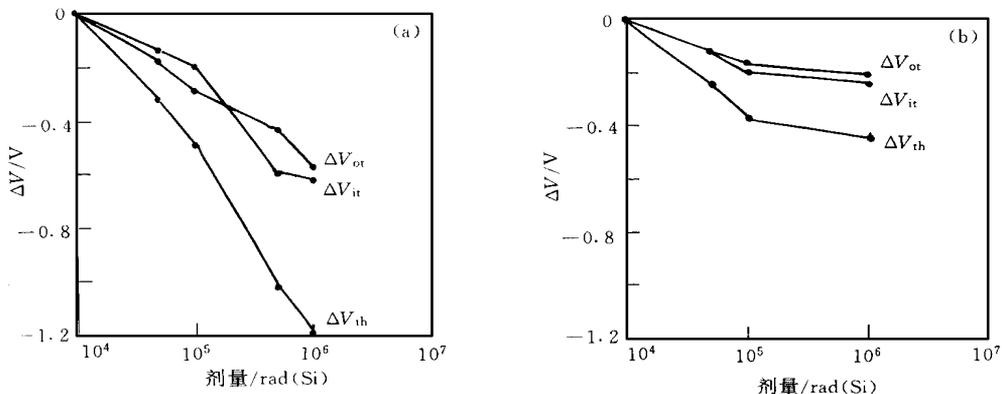


图 3 PMOSFET 阈值电压的漂移量及氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷引起的电压漂移量随辐射剂量的变化关系  
(a) 20rad(Si)/s, (b) 100rad(Si)/s

### 4.3 CMOS 倒相器的辐射特性

图 4 给出了 CMOS 倒相器的转换电压  $\Delta V_{tr}$  随辐射剂量的变化关系. 随着辐射剂量的变化, 转换电压向负电压方向漂移, 且随着辐射剂量的增加漂移量也在增加. 在同样的辐射剂量下, 转换电压的漂移量还与辐射剂量率有关. 辐射剂量率低时, 转换电压的漂移量较大. 与转换电压一样, CMOS 倒相器的开门电压和关门电压与剂量率, 总剂量有同样的变化. 图 5 和图 6 分别给出了关门电压和开门电压的漂移量随辐射剂量的变化关系.

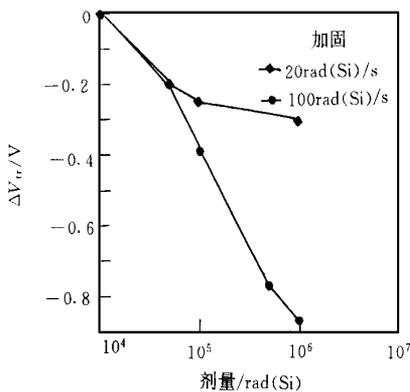


图 4 转换电压的漂移量与辐射剂量的变化关系

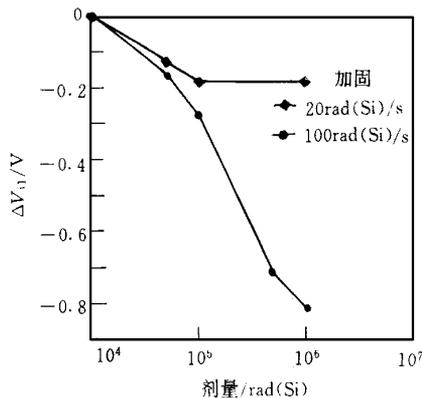


图 5 关门电压的漂移量  $\Delta V_{off}$  随辐射剂量的变化关系

以上结果表明, 对于 CMOS 器件, 辐射感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷不仅与辐射总剂量有关, 而且还与辐射剂量率有关. 辐射将在 MOS 器件的栅氧化层内产生电子-

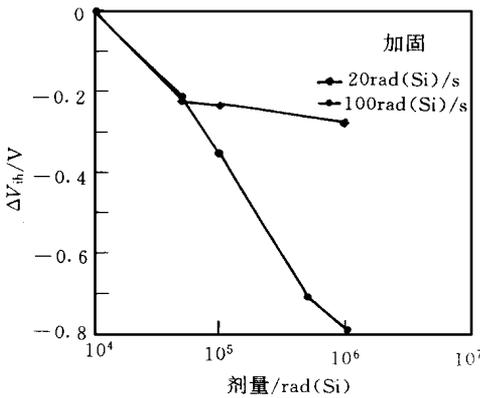


图 6 开门电压的漂移量  $\Delta V_{th}$  随辐射剂量的变化关系

空穴对, 这些辐射感生的电子-空穴在经历了初始的复合后, 剩余的电子-空穴对中的电子, 在外电场作用下以  $20\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  (室温下)<sup>[10]</sup> 的漂移速度很快漂移到电极而被复合, 而空穴在栅氧化层中的运动很慢其典型的漂移速度为  $10^{-4} \sim 10^{-11} \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[17]</sup>, 其漂移速度依赖于电场强度和温度且远远小于电子的漂移速度。相对于电子空穴几乎是不动的。经过初始复合后剩余的空穴将在外电场作用下在  $\text{SiO}_2$  中向  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  界面漂移。所剩余的空穴将会引起阈值电压的漂移。在正偏压下, 空穴将经过一段时间运动到负电极 (在正偏压时为 Si 衬底并在此被收集或被陷阱所俘获, 与此同时将会在  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  产生辐射感生界面陷阱电

荷。在相同的辐射偏置条件下, 辐射产生的电子-空穴对与辐射总剂量有关, 辐射总剂量越大, 辐射感生的电子空穴对越多, 经过初始复合后乘余的空穴越多, 辐射感生氧化物陷阱电荷越多而将会引起阈值电压的漂移越大。与此同时, 剩余空穴运动到界面处而产生界面陷阱电荷的数量越大, 从而引起阈值电压的漂移越大。在相同的辐射剂量下, 用不同辐射剂量率辐射时, 由于要达到相同的辐射剂量所需要的时间不同而使器件表现出剂量率效应来。对于低的辐射剂量率下, 空穴有较长的漂移时间可以在  $\text{SiO}_2$  中和  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  界面产生相对多的辐射感生氧化物陷阱电荷及辐射感生界面陷阱电荷。我们的实际结果已表明了这一点。另外, 由于辐射的氧化物陷阱电荷将会引起辐射时氧化物中的电场强度, 也是器件表现出不同程度的剂量率效应的重要因素之一。

## 5 结论

(1) 加固 CMOS 器件在电离辐射作用下, 其 NMOSFET 和 PMOSFET 的亚阈曲线会发生平移和畸变。亚阈曲线的平移和畸变与辐射剂量和剂量率有关。

(2) 加固的 NMOSFET 和 PMOSFET 的阈值电压随着辐射剂量的增加而减小。且辐射剂量率越小, 阈值电压的漂移量越大。

(3) 辐射感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷随着辐射剂量的增加而增加。在同样的辐射剂量下, 剂量率越小, 辐射感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷越多。

(4) CMOS 倒相器的电压传输特性曲线随着辐射剂量的增加而向负电压方向漂移。

(5) CMOS 倒相器的转换电压, 开门电压及关门电压都随辐射剂量的增加向负电压方向漂移。其漂移量随着辐射剂量的增加而增加。在相同的辐射剂量下, 剂量率越小, 它们的漂移量越大。

## 参 考 文 献

- [ 2 ] P. S. Winokur *et al* , IEEE Trans Nucl. Sci , 1985, NS-32(6): 1395
- [ 3 ] A. H. Johnston *et al* , IEEE Trans Nucl. Sci , 1986, NS-33(6): 1487.
- [ 4 ] T. P. M a , Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits, New York, A Wiley-Interscience Publication, 1989
- [ 5 ] P. J. McWhorter *et al* , Appl Phys Lett , 1986, 48(2): 133
- [ 6 ] 半导体集成电路, 北京: 国防工业出版社, 1984, 275
- [ 7 ] H. E. Boesch *et al* , IEEE Trans Nucl. Sci , 1975, NS-22(6): 2163~ 2167.
- [ 8 ] R. C. Hughes *et al* , IEEE Trans Nucl. Sci , 1975, NS-22(6): 2227~ 2233
- [ 9 ] H. Edwin Boesch *et al* , IEEE Trans Nucl. Sci , 1985, NS-32(6): 3940~ 3945
- [ 10 ] R. C. Hughes *et al* , Phys Rev. Lett , 1973, 30: 1333

## Ionization Radiation Character of CMOS Devices Under Differential Dose Rate

Zhang Zhengxuan<sup>1,2</sup>, Luo Jinsheng<sup>1</sup>, Yuan Renfeng<sup>2</sup>, He Baoping<sup>2</sup>, Jiang Jinghe<sup>2</sup>

(1 Microelectronic Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

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

Received 15 April 1998, revised manuscript received 14 September 1998

**Abstract** Harden CMOS devices are tested under two different dose rates. The sensitive parameters related to the total-dose and the dose rate including the threshold voltage of MOSFET,  $V_{th}$ ,  $V_{in}$  and  $V_{il}$  of CMOS inverter are studied in detail. At last, the experiment results are analysed and discussed.

**PACC:** 6180; **EEACC:** 2570D