

# SOI MOSFET 因辐照引起的部分耗尽与全耗尽过渡区的漂移\*

万新恒 张 兴 黄 如 甘学温 王阳元

(北京大学微电子学研究所, 北京 100871)

**摘要:** 首次报道了辐照所引起的 SOI/MOS 器件 PD(部分耗尽)与 FD(全耗尽)过渡区的漂移。基于含总剂量辐照效应的 SOI MOSFET 统一模型, 模拟了 FD 与 PD 过渡区随辐照剂量的漂移。讨论了辐照引起 FD 与 PD 器件转化的原因, 进一步分析了 FD 与 PD 器件的辐照效应。

**关键词:** SOI MOSFET; 辐照特性

**EEACC:** 0170N; 2560R

**中图分类号:** TN 386.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2001)03-0358-04

## 1 引言

当前, SOI(Silicon-on-Insulator)技术主要应用于空间及军事电子等领域制作抗辐照器件和电路, 国外已研制出了抗 0.5MGy(Si)剂量的 CMOS/SIMOX 电路<sup>[1]</sup>。国际上对于体硅材料及 MOSFET 的辐照效应已进行了大量的研究<sup>[2]</sup>, 但大多集中于加固工艺和辐照试验方面, 在辐照机理和模拟方面研究还不多<sup>[3]</sup>。一方面, 随着电路结构的发展, 除了传统的辐照效应, 如总剂量效应、单粒子事件(SEU)和剂量率效应外, 还出现了一些新的现象, 如 multi-bit upset, microdose, gate rupture errors 和 micro-latch 等。另一方面, 对单个器件辐照效应的研究也不断深入。随着 SOI 技术的发展, 迫切需要研究 SOI 器件和电路因辐照引起的新现象, 以指导抗辐照器件与电路的设计。

本文首次报道了辐照所引起的 SOI MOSFET 器件 FD 与 PD 过渡区的漂移。基于含总剂量辐照效应的 SOI MOSFET 统一模型, 模拟了 FD 与 PD

过渡区随辐照剂量的漂移, 并对模拟结果进行了分析和讨论。

## 2 模拟结果及讨论

从 Poisson 方程出发, 我们首先导出了 SOI MOSFET 的前表面势  $\Phi_f$  和背表面势  $\Phi_b$  随辐照剂量等参量的函数关系<sup>[4]</sup>:

$$\Phi_f = f(V_g, V_{sub}, D, t_{ox}, N_a) \quad (1)$$

$$\Phi_b = f(V_g, V_{sub}, D, t_{ox}, N_a) \quad (2)$$

其中  $V_g$ 、 $V_{sub}$  分别为正、背面栅电压;  $D$  为辐照剂量;  $t_{ox}$  为栅氧厚度;  $N_a$  为沟道掺杂浓度。

一旦求得了表面势, 可采用与 PCIM 模型<sup>[5]</sup>类似的方法, 推导出短沟道 DC MOSFET 模型。还考虑了寄生双极晶体管效应<sup>[6]</sup>。该模型用单一漏电流方程描述, 对器件弱反型区和强反型区均适用。该模型能自动计入手耗尽条件, 也不需要分类考虑不同膜厚时的情况。

利用上述模型, 可以模拟 SOI MOSFET 因辐照所引起的 FD 与 PD 过渡区的漂移。

\* 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题。

万新恒 男, 1972 年出生, 博士研究生, 主要从事 SOI 器件新栅介质和辐照效应及加固技术的研究。

张 兴 男, 1965 年出生, 博士, 教授, 主要从事 SOI 工艺、设计及模拟等方面的研究。

黄 如 女, 1969 年出生, 博士, 主要从事 SOI 新器件及 SOI/BiCMOS 电路等方面的研究。

2000-06-20 收到, 2000-11-23 定稿

©2001 中国电子学会

图 1 为硅膜厚度为 200nm 时, n 沟 MOSFET 在无辐照和低剂量辐照条件下,  $\phi_a$  和  $\phi_b$  随栅压变化的模拟结果。栅氧化层厚度为 390nm, 埋氧化层厚度为 380nm。根据我们在新疆物理所进行的 $^{60}\text{Co}$ 源  $\gamma$  射线辐照实验, 辐射时的剂量率取为 0.52Gy(Si)/s。由图可看出 PD 和 FD 之间的转化。无辐照时, 当  $V_{gs} = 0$ , 器件处于 PD 状态 ( $\phi \approx 0$ ) ; 但当  $V_{gs} > 0.5\text{V}$  时, 器件处于 FD 状态。在  $\gamma$  射线辐照下(如  $D = 2 \times 10^3\text{Gy(Si)}$ ), 当  $V_{gs} = 0$ , 器件处于 PD 状态 ( $\phi \approx 0$ ) ; 但当  $V_{gs} > 0.43\text{V}$  时, 器件开始进入 FD 状态。可见, 当硅膜较厚时, 在一定偏压下, 辐照增生的界面陷阱电荷和氧化层陷阱电荷可能使器件从 PD 转化为 FD, 辐照使 SOI MOSFET 在较小的偏压下由 PD 转化为 FD。

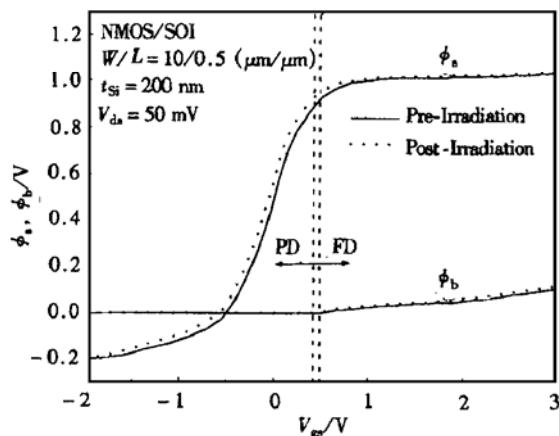


图 1 硅膜厚度为 200nm 时, n 沟 MOSFET 在无辐照和低剂量辐照条件下,  $\phi_a$  和  $\phi_b$  随栅压变化的模拟结果

FIG. 1 Simulation Results of  $\phi_a$  and  $\phi_b$  for nMOSFET Before and After Irradiation when Thickness of Si Film Being 200nm

图 2 为硅膜厚度为 50nm 时, n 沟 MOSFET 在无辐照和低剂量辐照条件下,  $\phi_a$  和  $\phi_b$  随栅压变化的模拟结果。无辐照时, 当  $V_{gs} = 0$ , 器件处于 FD 状态; 但当  $V_{gs} < -0.3\text{V}$  时, 器件处于 PD 状态 ( $\phi \approx 0$ )。在  $\gamma$  射线辐照条件下(如  $D = 2 \times 10^3\text{Gy(Si)}$ ), 当  $V_{gs} = 0$ , 器件处于 FD 状态; 但当  $V_{gs} < -0.5\text{V}$  时, 器件开始进入 PD 状态 ( $\phi \approx 0$ )。可见, 当硅膜较薄时, 在一定偏压下, 辐照增生的界面陷阱电荷和氧化层陷阱电荷也会使 PD 和 FD 过渡区发生漂移。

由此可见, SOI MOSFET PD 和 FD 之间的转化除了依赖于硅膜厚度、硅膜中的掺杂浓度和偏置

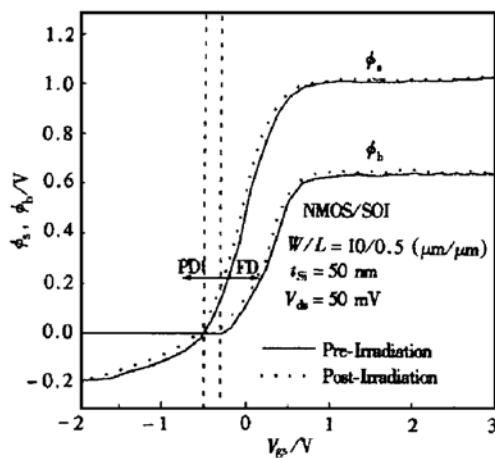


图 2 硅膜厚度为 50nm 时, n 沟 MOSFET 在无辐照和低剂量辐照条件下,  $\phi_a$  和  $\phi_b$  随栅压变化的模拟结果

FIG. 2 Simulation Results of  $\phi_a$  and  $\phi_b$  for nMOSFET Before and After Irradiation when Thickness of Si Film Being 50nm

条件外, 还受辐照剂量的影响。对 p 沟 MOSFET, 工作在负偏压下, 它的界面态电荷显正电性, 助长了阈值电压向负电压方向漂移。但对于 n 沟 MOSFET 情况有所不同, 在电离辐射下俘获正空间电荷使阈值电压向负电压方向漂移, 在高剂量下因为界面态电荷显负电性, 补偿了部分正空间电荷的作用, 使阈值电压漂移得到部分恢复。因此, 在一定辐照条件下, 随着辐照剂量的增大, n 沟 MOSFET 将产生 PD 与 FD 过渡区的漂移越来越大, 但达到一定高剂量辐照时, 因为界面态电荷显负电性, 补偿了部分正空间电荷的作用, PD 与 FD 过渡区的漂移反而回弹变小。

图 3(a) 和 (b) 分别为硅膜厚度为 50nm 和 200nm 时, n 沟 MOSFET 所对应的亚阈值特性计算曲线。由图(a)可见, 辐照前 MOSFET 亚阈值斜率为理想值( $60\text{mV}/10$  倍), 经  $2 \times 10^3\text{Gy(Si)}$  辐照后亚阈值斜率增大到  $65\text{mV}/10$  倍。由图(b)可见, 此时由于存在浮体效应, 经  $2 \times 10^3\text{Gy(Si)}$  辐照后亚阈值斜率由  $80\text{mV}/10$  倍增大到  $85\text{mV}/10$  倍, 器件亚阈值电流会增大。由图 3 还可见, PD SOI MOSFET 的亚阈值斜率比相应的 FD SOI MOSFET 的值要大。

下面以最常见的增强型 SOI MOSFET 为例, 讨论辐照条件下 PD 器件与 FD 器件的区分及其辐照效应。

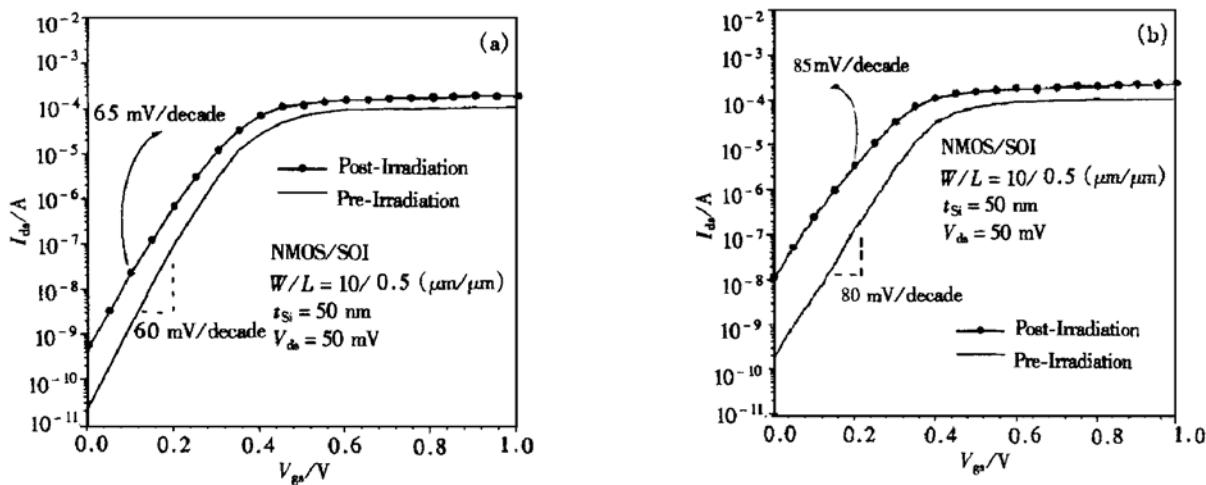


图 3 n 沟 MOSFET 所对应的亚阈值特性曲线 (a) 硅膜厚度为 50nm; (b) 硅膜厚度为 200nm

FIG. 3 Sub-Threshold Characteristics of nMOSFET (a) Thickness of Si Film being 50nm; (b) Thickness of Si Film being 200nm

由于 SOI 器件比体硅 MOS 器件多一埋氧层 (BOX)，也就多了一个总剂量辐照敏感区。电离辐照在栅介质和埋氧中产生正的氧化层陷阱电荷，在栅介质/Si 和 Si/BOX 处感生出界面陷阱电荷，引起 MOS 器件阈值电压漂移，迁移率退化，漏电流增大<sup>[2]</sup>。

通常 PD 器件和 FD 器件是根据硅膜厚度和膜中的掺杂浓度情况来区分的，而辐照感生的氧化层陷阱电荷和界面陷阱电荷使阈值电压漂移，如式(3)所示<sup>[7]</sup>，可等效于栅电压的漂移，使 SOI 器件在较小的栅电压下发生 PD 与 FD 的转化。

$$\Delta V_T = -\frac{q}{C_{ox}} \Delta N_{ot} + \frac{q}{C_{ox}} \Delta N_{it} = \Delta V_{ot} + \Delta V_{it} \quad (3)$$

其中  $q$  为电子电量； $C_{ox}$  为氧化层电容； $q\Delta N_{ot}$ 、 $q\Delta N_{it}$  分别为氧化层陷阱电荷和界面陷阱电荷。

当硅膜厚度大于二倍的最大耗尽区宽度时，正、背界面的耗尽层之间不互相影响，在它们中间存在一块中性区，屏蔽了辐照所引起的背界面电荷的影响，因而在辐照等恶劣环境之下，PD 器件还能保持良好的电学特性。

当硅膜厚度小于最大耗尽区宽度时，当器件开启时，硅膜可全部耗尽而不依赖于背栅偏压，正、背界面的耗尽层之间互相影响。与 PD SOI 器件相比，FD SOI 器件因前、背栅耦合，辐照感生的埋氧层陷阱电荷和界面陷阱电荷对其顶沟 MOS 产生更为明显的影响，而对辐照更为敏感<sup>[8]</sup>。有的作者甚至认

为，体引出结构(body tie)是消除 FD 器件因辐照引起的寄生结构的唯一办法<sup>[9]</sup>。

FD SOI 器件顶沟 MOS 阈值电压漂移可表述为<sup>[10]</sup>：

$$\Delta V_{tf} = \Delta V_{tf}^R + K \Delta V_{tb} \quad (4)$$

其中  $\Delta V_{tf}^R$  是辐照导致的前栅阈值电压漂移； $\Delta V_{tb}$  是埋氧层陷阱电荷引起的背栅阈值电压漂移； $K$  为耦合系数，可表述为：

$$K = \frac{C_{Si} C_{ob}}{C_{of}(C_{Si} + C_{ob} + C_{itb})} \quad (5)$$

其中  $C_{of}$ 、 $C_{ob}$  分别为氧化层电容和埋氧层电容； $C_{Si}$  为硅膜耗尽层电容， $C_{of}$ 、 $C_{ob}$  和  $C_{Si}$  不随辐照剂量变化； $C_{itb}$  为随辐照剂量变化的背界面态电容。

由此可见，由于埋氧(BOX)的存在导致 SOI 器件抗总剂量效应反而比体硅差，因此 SOI 技术应用于抗辐照领域，首先要考虑总剂量加固水平，其关键是抑制两个寄生管的导通(背沟和侧沟 MOS 管)，旨在减少栅介质和埋氧中的氧化层陷阱电荷以及栅介质/Si 和 Si/BOX 处的界面态电荷。与 FD 器件相比，PD 器件因在辐照环境下仍能保持良好的电学特性而在抗辐照领域得到广泛应用。

### 3 结论

首次报道了辐照所引起的 SOI/MOS 器件 PD 与 FD 过渡区的漂移。基于含总剂量辐照效应的

SOI MOSFET 统一模型, 模拟了 FD 与 PD 过渡区随辐照剂量的漂移。讨论了辐照引起 FD 与 PD 器件转化的原因, 进一步分析了 FD 与 PD 器件的辐照效应。

## 参考文献

- [ 1 ] J. L. Leray, E. Dupont-Nivet and M. Raffaelli, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1990, **37**(6): 2013.
- [ 2 ] T. P. Ma and P. V. Dressendorfer, Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits, A Wiley-Interscience Publication, 1989.
- [ 3 ] R. J. Milanowski, M. P. Pagey, L. W. Massengill *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1998, **45**(6): 2593.
- [ 4 ] WAN Xinheng, GAN Xuewen, ZHANG Xing, HUANG Ru and WANG Yangyuan, A Short-Channel SOI MOSFET Model Induding Total Dose Effects, Chinese Journal of Semiconductors, to be published[ 万新恒, 甘学温, 张兴, 黄如, 王阳元, 短沟道 SOI MOSFET 总剂量辐照效应模型, 半导体学报, 待发表].
- [ 5 ] N. D. Arora, R. Rios and C. L. Huang, IEEE Trans. Electron Devices, 1994, **41**(6): 988.
- [ 6 ] XI Xuemei and WANG Yangyuan, Chinese Journal of Semiconductors, 1996, **17**(5): 80[ 奚雪梅, 王阳元, 半导体学报, 1996, **17**(5): 80].
- [ 7 ] K. F. Galloway and R. D. Schrimpf, Microelectronics Journal, 1990, **21**(2): 67.
- [ 8 ] W. C. Jenkins and S. T. Liu, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1994, **41**(6): 2317.
- [ 9 ] V. F. Cavrois, O. Musseau, J. L. Leray *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1997, **44**(6): 965.
- [ 10 ] H. K. Lim and J. G. Fossum, IEEE Trans. Electron Devices, 1983, **30**(11): 1244.

## Shift of Transitions Between Partially and Fully-Depleted Behavior in SOI MOSFET due to Radiation\*

WAN Xin-heng, ZHANG Xing, HUANG Ru, GAN Xue-wen and WANG Yang-yuan

(Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The shift of transitions between partially and fully-depleted behavior in SOI MOSFET due to the radiation is first reported. Based on the derived fully continuous compact SOI MOSFET model, including the total dose effects, the shift of transitions between partially and fully-depleted behavior due to the radiation is simulated. Furthermore, the total dose ionizing effects of the partially and fully-depleted SOI MOSFETs are briefly discussed.

**Key words:** SOI MOSFET; radiation characteristics

**EEACC:** 0170N; 2560R

**Article ID:** 0253-4177(2001)03-0358-04

\* Project Supported by Science Research Foundation of Doctoral Discipline Point at High School.

WAN Xin-heng male, born in 1972, Ph. D candidate, is engaged in the research on SOI devices, irradiation effect and hardness technology.

ZHANG Xing male, born in 1965, Ph. D, professor, is engaged in the research on SOI technology, design and simulation.

HUANG Ru female, born in 1969, Ph. D, is engaged in the research on SOI new devices and SOI/BiCMOS circuits.