

部分耗尽型注氟 SIMOX 器件的电离辐射效应

李 宁¹ 张国强¹ 刘忠立¹ 范 楷¹ 郑中山¹ 林 青² 张正选² 林成鲁²

(1 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(2 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘要: 采用在 SIMOX 圆片埋氧层中注入氟(F)离子的方法改善 SIMOX 的抗总剂量辐射能力,通过比较未注 F 样品和注 F 样品辐照前后 SIMOX 器件 $I_{ds}-V_{gs}$ 特性和阈值电压,发现 F 具有抑制辐射感生 pMOSFET 和 nMOSFET 阈值电压漂移的能力,并且可以减小 nMOSFET 中由辐照所产生的漏电流.说明在 SOI 材料中前后 Si/SiO₂ 界面处的 F 可以减少空穴陷阱密度,有助于提高 SIMOX 的抗总剂量辐射能力.

关键词: SIMOX; 氟; 总剂量辐射

PACC: 6170T; 8140; 0750; 0260

中图分类号: TN386 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)02-0349-05

1 引言

自从 SOI 诞生以来,其优秀的绝缘特性和抗辐照能力吸引了众多研究小组的关注.近十年来,以离子注入形成的 SIMOX 材料由于成本低和工艺相对简单而得到迅速的发展.现在 SOI 材料不论在军用还是在民用方面都得到了广泛的应用.以 SOI 来替代 Si 材料制造大规模集成电路在技术上已经没有很大障碍.

尽管 SOI 材料由于其特殊的结构在抗瞬态辐照和单粒子效应上有很大的优势,但其抗总剂量辐射损伤的能力与体 Si 材料相比并没有显著的提高.这是由于在制成的 SOI 器件中,SOI 结构存在两个 Si/SiO₂ 界面(顶硅/BOX(埋氧层)和衬底硅/BOX),这会使其抗总剂量辐照能力有所下降,尤其是用 SIMOX 制造的部分耗尽型器件,其寄生的背沟道将会增加器件的漏电流,并直接影响到器件的阈值电压.

近年来,国内外对 SIMOX 的研究主要集中在以下几个方面^[1~5]:BOX 的优化、器件参数的提取和模拟、器件结构和工艺技术、埋氧介质中的缺陷和电荷、MOSFET/SIMOX 的制作及 CMOS 的抗辐照加固和抗热载流子效应,并取得了较大的研究进展.本文主要针对 SIMOX 埋氧层的抗辐照加固技术进

行研究.我们在部分耗尽的 MOSFET/SIMOX 上采用注 F 离子的方法来改善其抗辐照性能,实验表明,注 F 的部分耗尽型 MOSFET/SIMOX 的抗辐照加固特性得到明显改善.

2 原理

在 MOS 器件中,Si 和 SiO₂ 的界面处存在大量的空穴陷阱.一般认为这是由于在 Si/SiO₂ 的界面附近存在着 Si—O—Si 的应变键,其键角已发生改变而不是 144°了.这些键很容易由于电离辐射而发生断裂,形成非桥键氧和三价硅.其中三价硅是施主型缺陷,且固定不动,而非桥键氧将会在截面的应变梯度作用下移向 Si/SiO₂ 界面.

当 射线穿过 MOS 器件时,电离辐射将会被 Si 和 SiO₂ 吸收产生电子空穴对,同时也使 Si—O—Si 的应变键断裂形成空穴陷阱.在存在正电场的情况下,迁移率很高的电子将通过电极被迅速扫出 SiO₂,而空穴则会在电场的作用下向 Si/SiO₂ 界面移动,并在界面处被空穴陷阱俘获而形成正空穴陷阱电荷.这些正空穴陷阱电荷通过静电感应将在沟道层中感生出等量的负电荷,相当于在 Si 中掺杂了 n 型杂质,从而使 MOS 器件的阈值电压向负方向漂移.

F 在 SiO₂ 中的行为可以被认为是 F 与 Si/SiO₂ 界面处的三价硅结合形成 Si—O—F 的结构,因而

李 宁 男,1977 年出生,工程师,现从事 SOI 抗辐射改性和 SiGe 器件物理方面的研究工作.

张国强 男,1962 年出生,博士生导师,主要从事 SOI 器件及电路的辐射可靠性和热载流子效应研究工作.

刘忠立 男,1940 年出生,博士生导师,主要从事半导体器件和物理研究.

2004-02-12 收到,2004-04-28 定稿

有效地减少 Si/SiO₂ 界面的空穴陷阱密度。

3 样品制备及实验方法

实验所用样品是在 100mm 标准氧注入的 SIMOX 圆片上制作 pMOS 和 nMOS 器件,衬底为 p 型 Si, (100) 晶向,电阻率为 20 Ω·cm,注 F 条件如表 1 所示。

表 1 SIMOX 圆片上的注 F 工艺条件

Table 1 F implantation condition of SIMOX wafer

样品编号	注 F ⁺ 能量 / keV	注 F ⁺ 剂量 / cm ⁻²	顶硅及 BOX 厚度 / nm
A	140	1 × 10 ¹⁵	顶 Si 厚度: 195 ~ 205; BOX 厚度: 372 ~ 375
B	140	2 × 10 ¹⁵	
C	140	5 × 10 ¹⁵	
D	标准注氧 SIMOX, 未注 F		

根据所提供的 SIMOX 圆片条件,我们制作的部分耗尽型 SIMOX 器件的主要工艺流程如下:

预氧化—光刻硅岛—漂预氧化物—预栅氧—沟道注入—漂预栅氧—栅氧化物生长—多晶硅生长及光刻—源漏注入—BPSG SiO₂ 沉积及回流—光刻接触孔—蒸 Al—光刻 Al—合金等。采用 p⁺ 体接触。

器件沟道长度为 1.2 μm,宽长比为 3,栅氧温度

为 875 °C,采用 H₂ + O₂ 合成氧化,栅氧厚度为 25nm,多晶硅厚度 < 500nm。

对 SIMOX 衬底圆片进行了 F 浓度分布的二次离子质谱(SIMS)分析。试验条件为:一次离子:O⁺, 能量 15keV,束流 92nA,扫描面积 250 μm × 250 μm;二次离子:负离子,能量 4.5keV,分析区直径 60 μm,真空度小于 1.3 × 10⁻⁶ Pa。

辐照是在中国科学院生物物理所的⁶⁰Co 源上进行,辐照剂量率为 16728.2rad(Si)/min,总剂量分别为 1 × 10⁵rad(Si)和 5 × 10⁵rad(Si)。辐照偏置选择“最劣”条件下进行实验^[6],也就是使 n 沟管处于“on”状态,p 沟管处于“off”状态下进行辐照,即对 nMOS, V_g = 2V, V_s = 0V, V_d = 0V, V_{sub} = 0V, V_{body} = 0V;对 pMOS, V_g = 2V, V_s = 2V, V_d = 0V, V_{sub} = 0V, V_{body} = 0V。

辐照过程中在栅极上加 33k Ω 的限流电阻,以防止静电对器件损伤。用 Keithley 4200 直流参数测试系统对 pMOS 和 nMOS 器件测试辐照前后的 I_{ds}-V_{gs} 特性曲线(对 pMOS,取 V_{ds} = -0.1V;对 pMOS, V_{ds} = +0.1V)。用斜率法从曲线中获得阈值电压值。

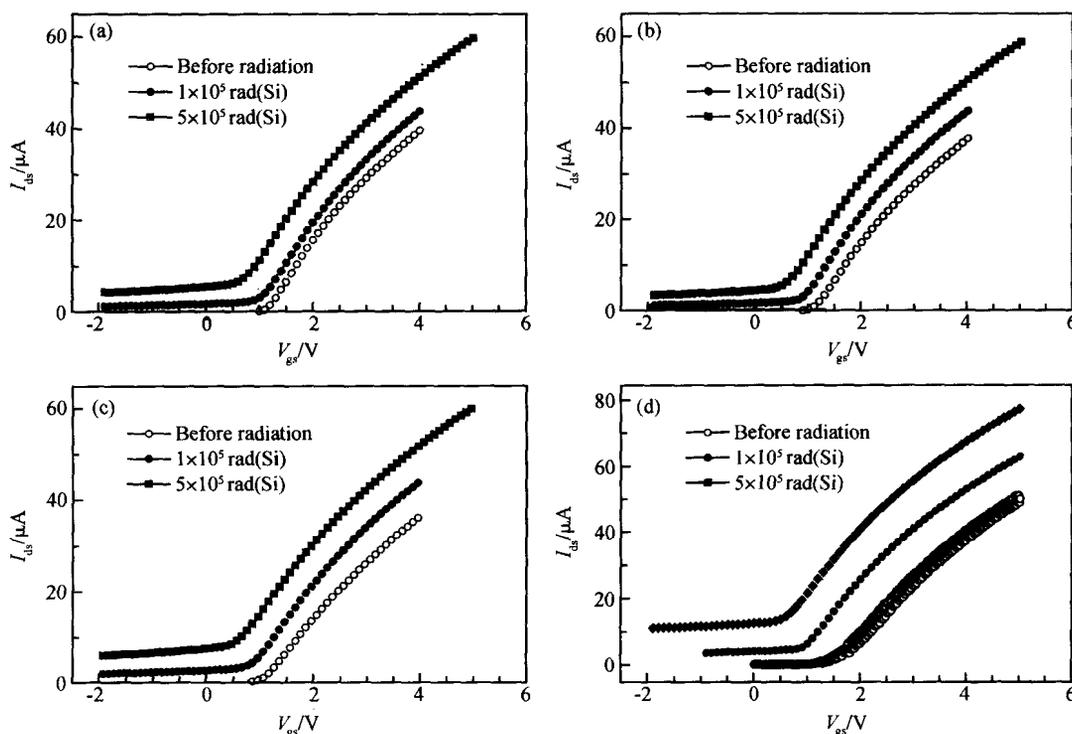


图 1 不同 nMOSFET 辐照前后的 I_{ds}-V_{gs} 特性 (a) A 样品;(b) B 样品;(c) C 样品;(d) D 样品

Fig.1 Pre- and post-radiation I_{ds}-V_{gs} characteristics of different samples' nMOSFETs (a) Sample A;(b) Sample B;(c) Sample C;(d) Sample D

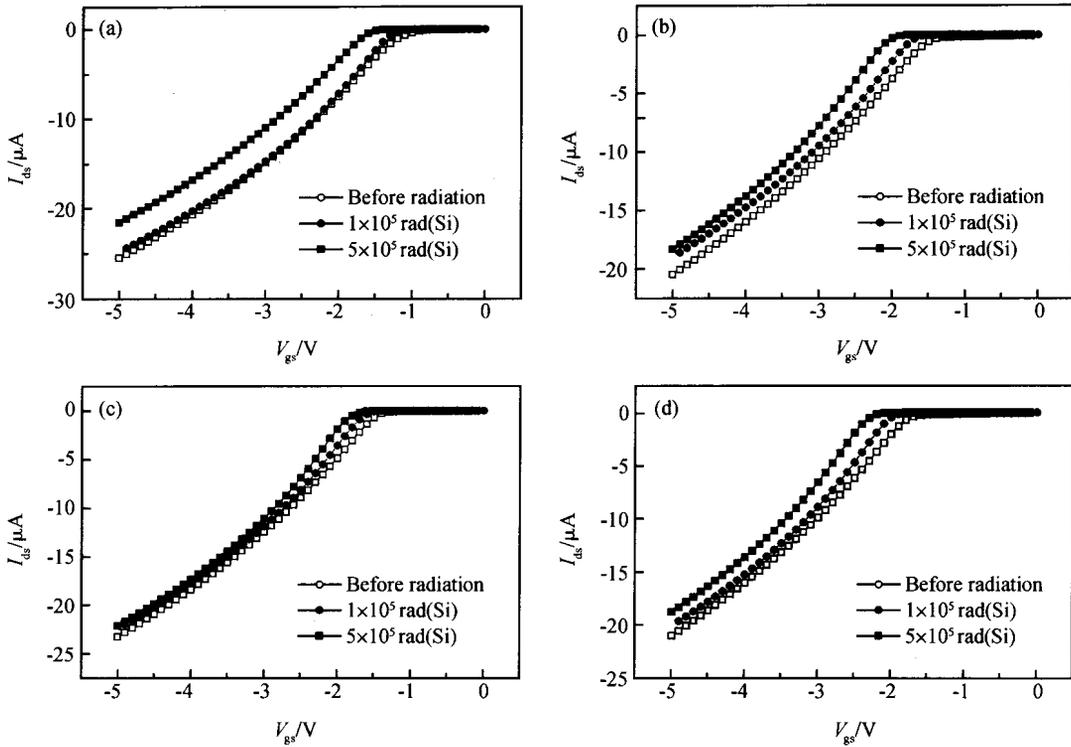


图 2 pMOSFET 辐照前后的 $I_{ds}-V_{gs}$ 特性 (a) A 样品;(b) B 样品;(c) C 样品;(d) D 样品

Fig.2 Pre- and post-radiation $I_{ds}-V_{gs}$ characteristics of different samples 'pMOSFETs (a) Sample A;(b) Sample B;(c) Sample C;(d) Sample D

4 实验结果及讨论

对表 1 中四种工艺的 pMOS 和 nMOS 样品进行辐照实验,其结果如图 1,2 所示.

分析图中数据可见:随辐照剂量的增加,对 nMOSFET,阈值负向漂移增加,同时漏电流逐渐增大;对 pMOSFET,阈值也向负方向漂移,但漏电流增加较少.

阈值电压的负向漂移主要归结为在栅氧层和埋氧层中由辐射产生的氧化物电荷的积累.而漏电流的增加也与辐射在栅介质、场介质和埋氧介质及两个界面的陷阱空穴的积累有关.

为了能够更清楚地得了解 F 离子对 n 沟管与 p 沟管辐照对阈值电压的影响,得到阈值电压随辐照总剂量的变化结果,列于表 2 和表 3 中.

由表 2,3 和图 1,2 可见,不论是 nMOSFET 还是 pMOSFET,注 F 样品在 $1 \times 10^5 \text{ rad(Si)}$ 和 $5 \times 10^5 \text{ rad(Si)}$ 的总剂量辐照下阈值电压的漂移都比未注 F 的对比样品小.同时,注 F 的 nMOSFET 辐射

产生的漏电流也小于对比样品,表明在埋氧层上注 F 可以提高 SIMOX 的辐射加固能力,这是由于 F^+ 注入到 SIMOX 圆片并经过退火后,一定量的 F 已经存在于 SIMOX 的埋氧介质中,而且 F 的峰值出现在顶硅/BOX 或 BOX/衬底硅两界面附近,如图 3 所示.由于 F 能够减小 SIMOX 埋氧层及 BOX/衬底硅界面和 BOX/顶硅界面的空穴陷阱密度^[1,7],从而减小了辐射所引起的阈值电压负向漂移和漏电流的增加.因此,注 F 样品要比未注 F 样品具有更好的抗辐照能力.

表 2 nMOSFET 辐照后阈值电压的变化

Table 2 Threshold voltage shift of nMOSFETs after radiation

样品	辐照剂量	
	$1 \times 10^5 \text{ rad(Si)}$	$5 \times 10^5 \text{ rad(Si)}$
A	- 0.19	- 0.69
B	- 0.33	- 0.79
C	- 0.44	- 0.93
D	- 0.75	- 1.53

表 3 pMOSFET 辐照后的阈值电压的变化

Table 3 Threshold voltage shift of pMOSFETs after radiation

辐照剂量	$1 \times 10^5 \text{ rad (Si)}$	$5 \times 10^5 \text{ rad (Si)}$
样品		
A	- 0.12	- 0.40
B	- 0.21	- 0.32
C	- 0.20	- 0.36
D	- 0.27	- 0.73

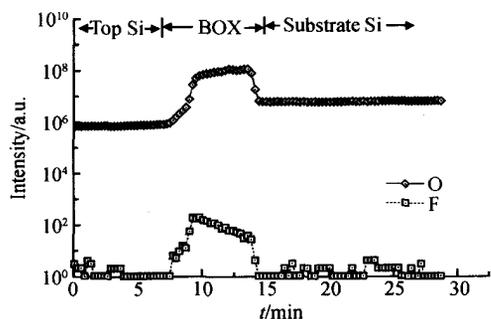


图 3 用 SIMS 方法获得的 F 在 SIMOX 中的纵向分布

Fig.3 Longitudinal distribution of F in the SIMOX by SIMS method

另外,关于注 F 剂量与 SIMOX 器件辐照效应的关系,表 2 的结果表明:随着注 F 剂量的增大,nMOSFET 阈值电压的漂移也增大,表明注 F 剂量是制约 SIMOX 器件辐射效应的重要因素之一。

5 结论

本文采用在 SIMOX 的 BOX 层中注入 F^+ 的方法来改善 SIMOX 器件的抗辐照加固能力,从辐照前后的 $I_{ds}-V_{gs}$ 特性以及阈值变化情况得出以下结论:

(1) 将适量的 F 离子注入到 SIMOX 的埋氧层中,明显抑制了辐射产生的 n 沟 MOSFET 阈值电压

的负向漂移,并且抑制了辐射所引起的 nMOSFET 漏电流的增加。

(2) F 引入 SIMOX 后,对辐照引起的 pMOSFET 阈值电压负向漂移也有抑制作用,但对辐射产生的漏电流影响不大。

SIMOX 中的 F 能够减少由辐射所产生的埋氧层及埋氧层前后界面的空穴陷阱,从而使注 F SIMOX 器件辐照损伤得到抑制。

参考文献

- [1] Zhu Shiyang, Lin Chenglu, Gao Jianxia, et al. Radiation induced charge trapping properties of SIMOX buried oxides with supplemental fluorine implant. Chinese Journal of Semiconductors, 1996, 17(9):693 (in Chinese) [竺士扬, 林成鲁, 高剑侠, 等. 注氟 SIMOX 隐埋 SiO_2 的辐照感生电荷分布特性. 半导体学报, 1996, 17(9):693]
- [2] Barchuk I P, Kilchitskaya V I, Lysenko V S, et al. Electrical properties and radiation hardness of SOI systems with multilayer buried dielectric. IEEE Trans Nucl Sci, 1997, 44(6):2542
- [3] Tsao S S, Fleetword D M, Weaver H T, et al. Radiation-tolerant, sidewall-hardened SOI/MOS transistors. IEEE Trans Nucl Sci, 1987, 34(6):1686
- [4] Fleetword D M, Tsao S S, Winokur P S, et al. Total-dose hardness assurance issues for SOI MOSFETS. IEEE Trans Nucl Sci, 1988, 35(6):1361
- [5] Annamalai N K, Bockman J F, McGruer N E. A comparison of buried oxide characteristics of single and multiple implant SIMOX and bond and tech back wafers. IEEE Trans Nucl Sci, 1990, 37(6):2001
- [6] Ferlet-Cavrois V, Colladant T, Paillet P, et al. Worst-case bias during total dose irradiation of SOI transistors. IEEE Trans Nucl Sci, 2000, 47(6):2183
- [7] Zhang Guoqiang, Yan Rongliang, Ren Diyuan, et al. Reliability in fluorinated CMOS devices. Microelectronics Journal, 1997, 28(5):581

Ionizing Radiation Effect of Partially-Depleted Fluoridated SIMOX

Li Ning¹, Zhang Guoqiang¹, Liu Zhongli¹, Fan Kai¹, Zheng Zhongshan¹,
Lin Qing², Zhang Zhengxuan², and Lin Chenglu²

(1 *Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

(2 *Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050*)

Abstract : Ionizing radiation effects of SIMOX devices by implanting fluorine ions into buried oxide (BOX) are studied. Pre- and post-radiation $I_{ds}-V_{gs}$ characteristics of different samples are used to analyse radiation hardness of fluoridated SIMOX. The experimental data show that the radiation-induced threshold voltage shift of pMOSFETs and nMOSFETs, as well as the radiation-induced increase of off-state leakage current of nMOSFETs can be restrained by fluorine implantation.

Key words : SIMOX; fluorine; total dose effect

PACC : 6170T; 8140; 0750; 0260

Article ID : 0253-4177(2005)02-0349-05

Li Ning male, was born in 1977, engineer. His research interest is in SOI radiation hardness devices and SiGe devices.

Zhang Guoqiang male, was born in 1962, professor. His research interest is in SOI devices and integrated circuits.

Liu Zhongli male, was born in 1940, professor. His research interest is in integrated circuit, radiation hardness devices, and semiconductor devices.

Received 12 February 2004, revised manuscript received 28 April 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics