

注氟 SIMOX 隐埋 SiO₂ 的辐照 感生电荷分布特性

竺士爌 林成魯

(中国科学院上海冶金研究所信息功能材料国家重点实验室 上海 200050)

高剑侠 李金华*

(中国科学院新疆物理研究所 乌鲁木齐 830011)

(* 江苏石油化工学院 常州 213016)

摘要 对常规工艺制备的 SIMOX(Separation by IMplantation of OXygen)材料,注入不同剂量的 F⁺并退火,其电容经⁶⁰Co γ射线电离辐照后平带电压漂移较小,通过同理论值相比较,说明 F⁺的注入减少了 SIMOX 隐埋 SiO₂ 层(BOX: Buried OXide) 的空穴陷阱浓度,增强了 SIMOX 的抗电离辐照能力.

PACC: 6170T, 8140, 0750, 0260

1 引言

以离子注入形成 SIMOX 为先导的 SOI(Silicon On Insulator)技术近几年来发展十分迅速,由于用 SOI 材料制备的器件敏感区小和全介质隔离,具有优良的抗瞬时辐照和单粒子事件(SEU)能力^[1],但其抗总剂量辐照的能力并没有本征的提高,反而由于存在寄生背沟 MOS 结构(以 BOX 为栅),而比相应的体硅器件有所下降,特别是用 SIMOX 材料制备的薄膜全耗尽器件,背沟区同顶沟区耦合,BOX 的电学性质严重影响器件顶沟区的性能,而且 SIMOX 的 BOX 是大剂量氧离子注入形成的,其质量不如热生长 SiO₂,具有较高浓度的陷阱缺陷,辐照后产生较多的陷阱电荷,可能使寄生背沟 MOS 导通而使器件失效,因此抑制 BOX 层辐照感生电荷是提高 SIMOX 器件抗总剂量辐照性能的关键^[2]. 用注 F⁺来加固热生长栅氧化层已有许多报道^[3,4],本文的结果表明 F⁺注入也能提高 SIMOX 材料 BOX 层的抗辐照性能.

竺士爌 男,93届博士生,从事 SIMOX 材料及其器件的辐照、高温性能研究

林成魯 男,研究员,博士生导师,离子束合成专家

1995年5月22日收到初稿,1995年7月21日收到修改稿

2 样品的制备及测试

电阻率为 $10\sim13\Omega\cdot\text{cm}$ 的 P 型(100)Si, 经清洗后, 注入能量为 200keV, 总剂量为 $1.8\times10^{18}\text{cm}^{-2}$ 的 O^+ , 分三次注入,

每次注入剂量 $0.6\times10^{18}\text{cm}^{-2}$ 后, 在 $\text{Ar}+1\%\text{O}_2$ 的气氛中 1300°C 退火 2 小时, 得到表层 Si 厚 220nm, 埋层 SiO_2 厚 430nm 的 SIMOX 材料。注入能量为 90keV, 剂量分别为 $5\times10^{12}\text{cm}^{-2}$ (P2 样品) 和 $5\times10^{13}\text{cm}^{-2}$ (P3 样品) 的 F^+ , 并在 N_2 气中 900°C 退火半小时, 作为比较, P1 样品没有注 F^+ 。F 的深度分布用型号为 CAMECA IMS-3F 的二次离子质谱仪测试。

用 P1、P2 和 P3 样品制备电容, 用 EWP 自停止腐蚀法剥去顶层 Si, 在两面蒸 Al 作为电极, 电容面积为 $1.98\times1.85\text{mm}^2$ 。

用新疆物理所的 ^{60}Co 源对封装后的电容进行 γ 射线累积剂量辐照, 辐照时顶部电极加 5V 偏压, 衬底电极接地。每次辐照后立即测量其高频 C-V 特性, 频率设定为 1MHz, 并将剂量累积。

3 实验结果

三种样品经不同剂量 γ 射线辐照后的高频 C-V 特性曲线如图 1 所示, 随着辐照剂量的增加, 曲线向负电压方向漂移, 说明在 BOX 层中产生辐照感生正电荷分布。同常规热生长

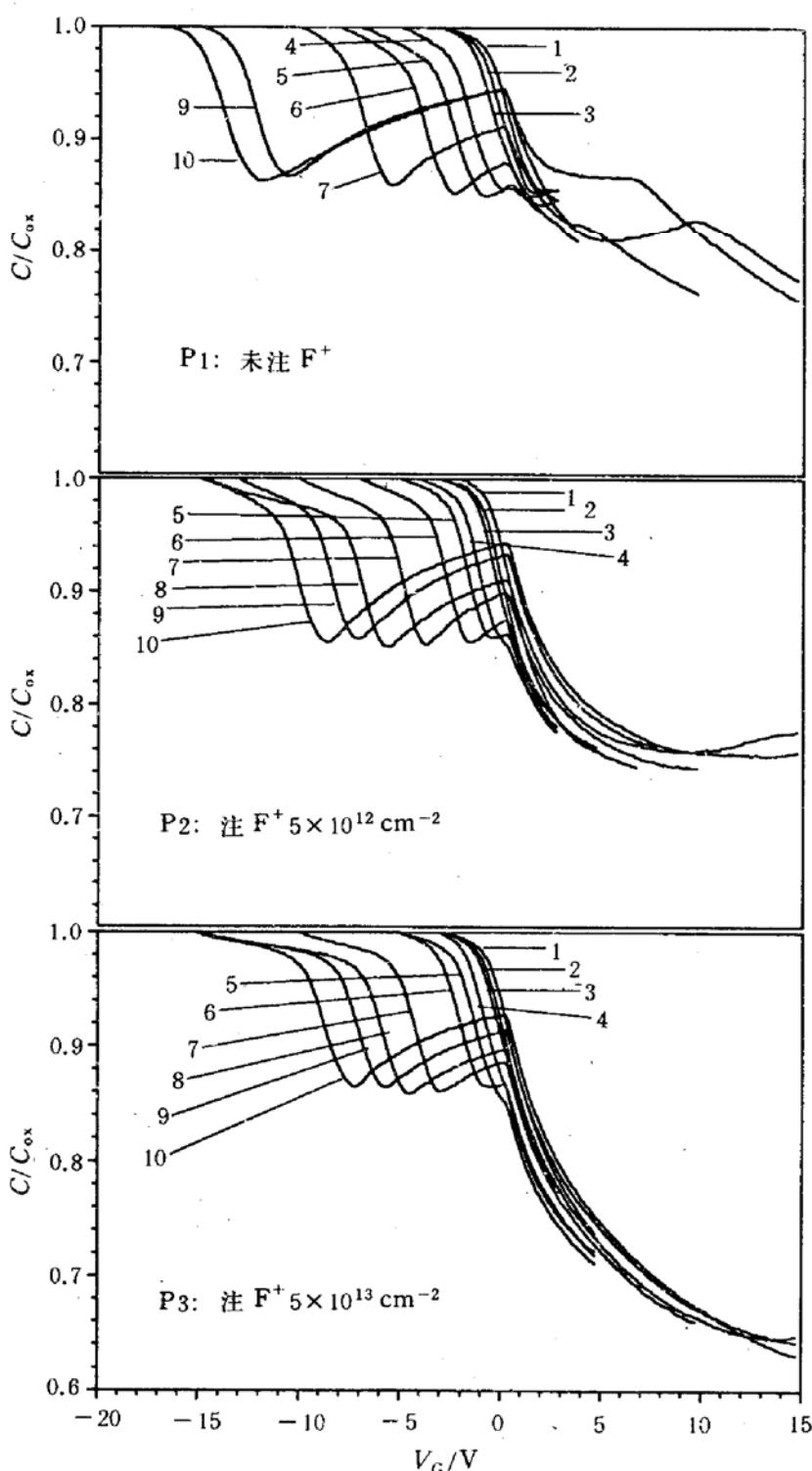


图 1 三种样品(P1、P2 和 P3)电容经不同剂量辐照后的高频 C-V 特性曲线

辐照剂量分别为:(1)辐照前;(2) 5×10^2 ; (3) 1×10^3 ; (4) 3×10^3 ; (5) 5×10^3 ; (6) 1×10^4 ; (7) 3×10^4 ; (8) 5×10^4 ; (9) 7×10^4 ; (10) $1\times10^5\text{rad}(\text{SiO}_2)$ 。

SiO₂ 的高频 C-V 特性曲线相比, 图 1 的曲线有较为严重的畸变, 随着偏置电压 V_G 从负向正扫描, 归一化电容 C/C_{ox} 到达极小后并没有保持恒定, 而是随 V_G 的增大而缓慢上升, 大约在 V_G=0V 处达到极大值, 然后随 V_G 的增大而迅速下降, 当 V_G 再增大时, 归一化电容基本趋于不变。这个结果似乎可以用 SIMOX 材料 BOX 层的特点来解释, 对于离子注入形成的氧化层, 其 Si/SiO₂ 界面不是很陡, 有一氧化不完全的过渡层, 也就是富 Si 的氧化层, 这相当于在 Al 电极同氧化完全的 SiO₂ 之间还存在一薄层 Si, 总的电容为三者串联: 1/C=1/C_D+1/C_{ox}+1/C_D, 其中 C_{ox} 为氧化层电容, C_D 为上表面 Si 的空间电荷区电容, C_D 为下表面 Si(衬底) 空间电荷区电容, 当 V_G 从负向正扫描时, 上表面 Si 从耗尽到积累, C_D 从较小值变到无穷大, 使总的电容呈现出如图 1 所示的形状。这也部分解释了实测的 C_{ox} 值小于理论值的原因(实测为 90pF 左右, 而理论值为 320pF), 因为在 V_G 处于较大负值时, 测量的电容其实是 C_{ox} 同反型状态的 C_D 串联值, 但实测值同理论值相差如此之大, 可能还同其它因素有关。

4 计算和讨论

假设在 BOX 中存在中性的电子陷阱和空穴陷阱, 则辐照时发生如下过程^[5~8]: (1) 产生电子、空穴对, 单位剂量产生率为 g₀; (2) 电子、空穴对分离且在电场作用下向两极迁移, 分离几率为 η; (3) 电子、空穴分别被各自的陷阱俘获, 俘获截面分别为 σ_{nt}, σ_{pt}; (4) 被俘获的电子、空穴分别同自由空穴、电子复合, 复合截面分别为 σ_{pr}, σ_{nr}。在低剂量率和高剂量辐照的条件下, 导带电子和价带空穴达到热平衡的弛豫时间远小于辐照时间, 因此可以认为其不随时间变化, 由载流子连续方程可得出陷阱电子和陷阱空穴的收集速率方程为^[5]:

$$\begin{aligned} \frac{dn_t}{dt} &= \frac{g_0 D \eta \sigma_{nt} (T_n - n_t)}{\sigma_{nr} p_t + \sigma_{nt} (T_n - n_t)} (1 - \exp\{-[\sigma_{nr} p_t + \sigma_{nt} (T_n - n_t)]x\}) \\ &\quad - \frac{g_0 D \eta \sigma_{pr} n_t}{\sigma_{pr} n_t + \sigma_{pt} (T_p - p_t)} (1 - \exp\{-[\sigma_{pr} n_t + \sigma_{pt} (T_p - p_t)](t_{ox} - x)\}) \\ \frac{dp_t}{dt} &= \frac{g_0 D \eta \sigma_{pt} (T_p - p_t)}{\sigma_{pr} n_t + \sigma_{pt} (T_p - p_t)} (1 - \exp\{-[\sigma_{pr} n_t + \sigma_{pt} (T_p - p_t)](t_{ox} - x)\}) \\ &\quad - \frac{g_0 D \eta \sigma_{nr} p_t}{\sigma_{nr} p_t + \sigma_{nt} (T_n - n_t)} (1 - \exp\{-[\sigma_{nr} p_t + \sigma_{nt} (T_n - n_t)]x\}) \end{aligned}$$

其中 D 是剂量率; T_n, T_p 分别为电子陷阱和空穴陷阱浓度; n_t, p_t 分别是被陷阱俘获的电子和空穴浓度, x 以 Si/SiO₂ 界面为 0 点, 偏压加在 x=t_{ox} 处, t_{ox} 为 BOX 厚度, 由于 BOX 中辐照感生电荷形成的内建电场叠加在外加电场上, 总的电场是空间 x 和时间 t 的函数, 分离几率 η 和四个截面 σ 都是电场的函数, 且其关系很复杂, 本文采用文献[6]给出的简单的近似表达式。我们开发了 CAOX 程序, 对上述二式和泊松方程的联立方程用经典 Runge-Kutta 法自洽求解。

一般认为, BOX 中电子陷阱是浅能级的, 在电场的作用下很快被再激发而扫出 BOX 区^[7], 所以我们设定 T_n 为一个较小的值, 而且忽略陷阱电子同自由空穴的复合。程序唯一未定的量是 T_p, 作为粗略的近似, 假设空穴陷阱在 BOX 中均匀分布, 文献报道 T_p 一般为 10¹⁸ cm⁻³ 量级^[8], 图 2 给出了 T_p 分别取 2.8×10¹⁸ cm⁻³, 1.9×10¹⁸ cm⁻³ 和 1.6×10¹⁸ cm⁻³ 时平带电压漂移 ΔV_{fb} 随辐照剂量变化的理论曲线和由图 1 得到的实验值, 两者吻合较好。在

这三种 T_p 分布下, 经 1×10^5 rad(SiO₂)辐照后 BOX 中的感生正电荷分布如图 2 的内插图所示, 可以看出尽管 T_p 均匀分布, 但感生电荷分布并不均匀, 主要集中在 BOX/衬底 Si 界面(后界面)附近, 主要是此界面附近的感生电荷影响 ΔV_{fb} , 因此上面给出的 T_p 值其实是反映了此界面附近的空穴陷阱浓度. F⁺的注入减小了 T_p , 且注 F⁺剂量大的样品(P3)减小得更多.

P3 样品退火前后的¹⁹F 深度分布如图 3 所示, 图中同时给出了¹⁶O 的信号以表明界面位置, 退火前 F 的分布同 TRIM94 模拟结果相近, 峰值在顶层 Si/BOX 界面(前界面)附近, 经高温退火后, 绝大部分顶层 Si 中的 F 聚集到前界面处, BOX 内的 F 有均匀分布的趋势, 但由于其扩散速率十分缓慢, 结果形成较退火前平坦的梯度分布, 后界面附近 F 浓度为 10^{18} cm⁻³量级, 这同前面假设的 T_p 同一数量级.

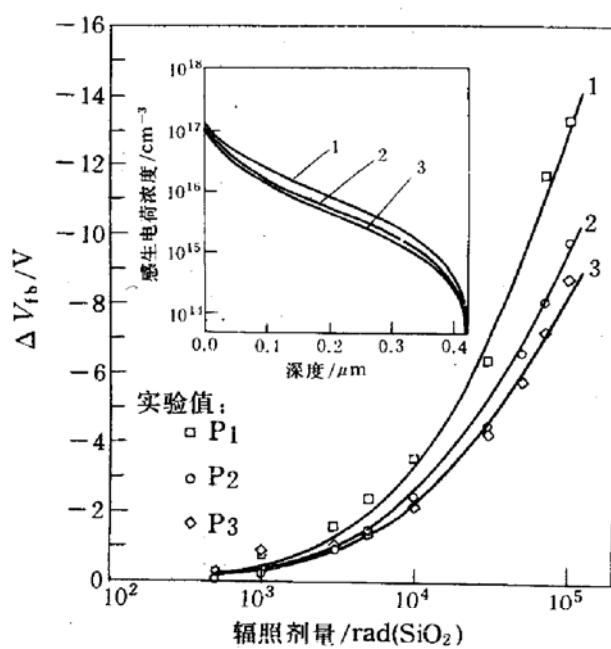


图 2 三种样品电容经不同剂量电离辐照后的

平带电压漂移实测值和模拟曲线

实验值:P1:方块;P2:圆圈;P3:菱形.

模拟曲线:1. $T_p = 2.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$;

2. $T_p = 1.9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$; 3. $T_p = 1.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$.

内插图: 在上面三种空穴陷阱浓度下, 经 1×10^5 rad(SiO₂)电离辐照后在 BOX 内的感生电荷分布.

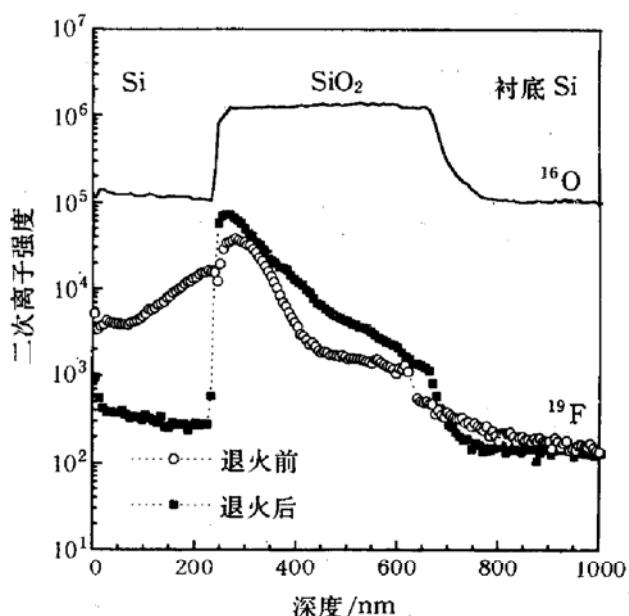


图 3 P3 样品退火前后¹⁹F 的 SIMS 深度分布,

同时给出¹⁶O 的信号以标定界面位置

5 结论

对注 F⁺和不注 F⁺的 SIMOX 材料的 BOX 电容进行了累积剂量电离辐照试验, 注 F⁺样品的平带电压漂移小于未注 F⁺样品, 且 F⁺注入剂量较高的样品优于注入剂量低的样品, 通过和理论值比较, 说明 F⁺的注入有效地减少了 SIMOX 的 BOX 中空穴陷阱浓度, 表明注 F⁺可能是一种较好的辐照加固技术.

参 考 文 献

- [1] J. P. Colinge, "Silicon-On-Insulator Technology: Materials to VLSI", Kluwer Academic Publ., 1991, Chap. 7.
- [2] Zhu Shiyang, Li Jinhua, Lin Chenglu *et al.*, "Total Dose γ -ray Irradiation Characteristics of CMOS Inverters Fabricated on SIMOX and BESOI Wafers", The 4th Inter. Conf. on Solid State and IC Technol., Beijing, 1995.
- [3] T.P. Ma, J. Vac. Sci. Technol., 1992, A10(4): 705.
- [4] Yasuhiro Nishioka, Kiyonori Ohyu, Yuzuru Ohji *et al.*, J. Appl. Phys., 1989, 66(8): 3909.
- [5] Der-Sun Lee and Chung-Yu Chan, J. Appl. Phys., 1991, 69(10): 7134.
- [6] Richard J. Krantz, Lee W. Aukerman and Thomas C. Zietlow, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1987, NS-34(6): 1196.
- [7] H. Edwin Boesch, Thomas L. Taylor and George A. Brown, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1991, 38(6): 1234.
- [8] O. Flament, D. Herve, O. Musseau *et al.*, IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1992, 39(6): 2132.

Radiation Induced Charge Trapping Properties of SIMOX Buried Oxides with Supplemental Fluorine Implant

Zhu Shiyang and Lin Chenglu

(State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Metallurgy, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

Gao Jianxia and Li Jinhua *

(Xinjiang Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)

(* Jiangsu Institute of Chemical Oil Engineering, Changzhou 213016)

Received 22 May 1995, revised manuscript received 21 July 1995

Abstract Different dose fluorine was implanted into standard SIMOX (Separation by IM-plantation of O_Xxygen) materials. After ⁶⁰Co γ -ray ionizing irradiation, the flatband voltage shifts of their capacitance were reduced. In comparison to numerical simulation results, it shows that F⁺ implant reduces the concentrations of hole trap centers in SIMOX buried oxides and improves their ionizing radiation hardness.

PACC: 6170T, 8140, 0750, 0260