

# SIMOX SOI 埋氧注氮工艺对埋氧中固定正电荷密度的影响<sup>\*</sup>

郑中山<sup>1,3)</sup> 张恩霞<sup>2)</sup> 刘忠立<sup>3)</sup> 张正选<sup>2)</sup> 李 宁<sup>3)</sup> 李国花<sup>3)</sup>

1) ( 济南大学物理系, 济南 250022 )

2) ( 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050 )

3) ( 中国科学院半导体研究所, 北京 100083 )

( 2006 年 12 月 11 日收到, 2007 年 1 月 7 日收到修改稿 )

在 SIMOX SOI 材料的埋氧中注氮是为了增强该类材料的抗辐射能力. 通过  $C-V$  研究表明, 对于埋氧层为 150 nm 的 SIMOX SOI 材料来说, 当在其埋氧中注入  $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  剂量的氮后, 与未注氮埋氧相比, 注氮埋氧中的固定正电荷密度显著增加了, 而对于埋氧层为 375 nm 的 SIMOX SOI 材料来说, 当注氮剂量分别为  $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  和  $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  时, 并未发现埋氧中固定正电荷密度的增加. 所有 SIMOX 注氮后的退火条件是完全相同的. 通过 SIMS 分析, 将薄埋氧中固定正电荷密度的增加归结为注氮后的退火所引起的氮在埋氧与 Si 界面附近的积累. 同时还发现, 未注氮埋氧中的固定正电荷密度是非常小的. 这意味着通常情况下在热生长  $\text{SiO}_2$  膜中大量存在的氧化物电荷, 其数量在 SIMOX 埋氧中则要相对少得多.

关键词: SIMOX, 埋氧, 注氮, 固定正电荷密度

PACC: 7340Q, 6170T

## 1. 引 言

在 SOI (silicon-on-insulator) 材料中, 因顶硅膜与衬底硅之间存在绝缘埋层, 使 SOI 技术具有诸多超越传统体硅技术的优势<sup>[1]</sup>, 被称为是 21 世纪的硅集成电路技术. 例如, 与传统的体硅 CMOS ICs 相比, 使用 SOI 材料制造的 CMOS ICs 具有速度快、功耗低的特点, 同时避免了体硅 CMOS ICs 中的闩锁效应. 在采用 SOI 技术的 DRAM 及 SRAM 电路中, 器件的有源区较薄 ( $< 300 \text{ nm}$ ),  $p-n$  结面积较小, 因而具有较强的抗单粒子辐射和高剂量率瞬时辐射的能力<sup>[2-5]</sup>. SIMOX (separation by implanted oxygen) SOI 材料是采用氧离子注入硅晶片工艺形成 SOI 结构的. 先将一定剂量的氧用与之相匹配的注入能量注入到硅片表面下的一定深度范围内, 然后, 经适当气氛的高温 ( $1300-1350^\circ\text{C}$ ) 退火在硅片中形成  $\text{SiO}_2$  绝缘埋层 (BOX). 由于在 BOX 内存在大量的空穴陷

阱<sup>[6]</sup>, 当器件处于电离辐射环境中时, 这些空穴陷阱将导致 BOX 中正电荷的积累, 从而引起器件及电路漏电电流的增加<sup>[7,8]</sup>. 因而, 与传统的体硅器件相比, BOX 的存在使 SOI 器件的抗总剂量辐射加固变得复杂. 通过向 SIMOX SOI 材料中的 BOX 注入一定剂量的氮, 可以改善 SIMOX SOI 材料的抗电离辐射性能<sup>[9]</sup>. 另有采用 BOX 注硅工艺提高材料抗辐射能力的报道<sup>[10]</sup>. 然而, BOX 注氮工艺在提高材料抗辐射能力的同时, 除了可能会对器件的电特性参数及顶栅氧的抗辐射能力造成一定的影响外<sup>[11,12]</sup>, 还可能对 BOX 本身产生一些其他性质的改变. 充分认识和了解这些改变, 并进而对其实施有效地控制, 对于更好地加固 SIMOX SOI 材料是非常必要的. 因此, 本文用 BOX 注氮的 SIMOX SOI 材料制作了 MBS (metal-BOX-silicon) 电容, 采用  $C-V$  方法对这些电容进行了测试分析, 并应用二次离子质谱 (SIMS) 对分析结果进行了验证.

<sup>\*</sup> 济南大学博士基金资助的课题.

## 2. C-V 原理

实验所用的 MBS 电容类同于金属-氧化物-半导体 (MOS) 电容, 区别仅在于用 BOX 层代替了通常的热生长  $\text{SiO}_2$  层. 因此, 对 MOS 电容的 C-V 特性分析理论<sup>[13]</sup>完全适用于本实验研究中的 MBS 电容. 于是, 对于一个 MBS 电容, 其总电容 C 应满足如下关系:

$$1/C = 1/C_{\text{BOX}} + 1/(C_s + C_{\text{it}}), \quad (1)$$

式中,  $C_{\text{BOX}}$  为 BOX 层电容;  $C_s$  为 Si 衬底表面空间电荷层电容;  $C_{\text{it}}$  为界面陷阱或界面态电容. 在高频 (通常为 1 MHz) 信号下, 界面陷阱的充、放电跟不上信号的变化, 所以界面陷阱电容  $C_{\text{it}} = 0$ . 此时, 系统的高频平带电容  $C_{\text{FB}}$  则为

$$C_{\text{FB}} = C_{\text{BOX}} C_{\text{sFB}} / (C_{\text{BOX}} + C_{\text{sFB}}), \quad (2)$$

式中,  $C_{\text{sFB}}$  为硅衬底平带电容, 满足关系

$$C_{\text{sFB}} = S (\epsilon_s N q^2 / kT)^2, \quad (3)$$

式中,  $S$  表示 MBS 电容栅电极的面积;  $\epsilon_s$  为半导体 Si 的介电常数;  $N$  为杂质掺杂浓度;  $q$  为电子电荷;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为温度. 根据测得的高频 MBS 电容最小值  $C_{\text{min}}$  及相关的半导体物理理论<sup>[14]</sup>, 可以得到下面的关系:

$$N/n_i = [C_{\text{BOX}} C_{\text{min}} / (C_{\text{BOX}} - C_{\text{min}})] 4kT (\epsilon_s q^2 S^2), \quad (4)$$

式中,  $n_i$  为半导体 Si 的本征载流子浓度. 据此, 可以算出掺杂浓度  $N$ , 并利用 (2) 式得到 MBS 电容的平带电容值  $C_{\text{FB}}$ . 在已知  $C_{\text{FB}}$  的情况下, 根据测得的 MBS 电容 C-V 特性曲线可得到系统的平带电压  $V_{\text{FB}}$ , 并求得 BOX 层的等效电荷面密度  $N_{\text{eff}}$ , 其表达式为

$$N_{\text{eff}} = (\Phi_{\text{ms}} - V_{\text{FB}}) C_{\text{BOX}} / qS, \quad (5)$$

式中,  $\Phi_{\text{ms}}$  为金属栅与半导体功函数差引起的接触势差. 本文栅材料为金属 Al,  $\Phi_{\text{ms}} < 0$ . 平带电压  $V_{\text{FB}}$  通常情况下为负值.

## 3. 实 验

### 3.1. 样品制备

采用两种标准的商业化 SIMOX SOI 材料制作 MBS 电容. 一种材料的 BOX 厚度约为 150 nm, 顶硅层厚度约为 190 nm, 称其为材料 A; 另一种材料的

BOX 厚度约为 375 nm, 顶硅层厚度约为 220 nm, 称其为材料 B. 制作两种材料的原始硅晶片皆为 100 p-Si, 电阻率在 10—20  $\Omega \cdot \text{cm}$  之间. 对于 A 材料, 向其 BOX 中注入  $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  剂量的氮, 注入能量分别为 110, 100, 90, 80 keV, 得到  $A_1, A_2, A_3, A_4$  四种 BOX 注氮的改性 A 材料; 对于 B 材料, 向其 BOX 中分别注入  $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  和  $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  剂量的氮, 注入能量为 160 keV, 得到  $B_1, B_2$  两种 BOX 注氮的改性 B 材料. 注氮期间, 衬底温度保持在 300°C. 注入完毕后, 在 1200°C,  $\text{N}_2$  气氛中进行退火, 退火时间为 4 h. 作为对照, 分别取未注氮的 A, B 材料  $A_0$  与  $B_0$ , 同经注氮改性的 A, B 材料一起, 按相同的工艺流程制作 MBS 电容.

MBS 电容的制作步骤: 首先, 用反应离子刻蚀 (RIE) 法去掉 SIMOX 材料的顶硅层. 清洗烘干后, 用电子束蒸 Al 制作电容样品的栅电极. 最后对制得的 MBS 电容进行封装, 以便于对电容样品的测试和保护. 由材料  $A_0$  至  $A_4$  制得的电容样品标记为 MBS/ $A_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3, 4$ ); 类似地, 由材料  $B_0$  至  $B_2$  制得的电容样品则标记为 MBS/ $B_i$  ( $i = 0, 1, 2$ ). 所有电容样品的 Al 栅面积均为  $1.96 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ .

### 3.2. 实验结果

使用计算机控制的 HP4275LCR 表对封装后的 MBS 电容进行高频 C-V 特性的测量, 所用频率为 1 MHz. 图 1 与图 2 分别是测量所得的 A, B 两系列 MBS 电容的 C-V 特性曲线. 据此 C-V 特性曲线, 并利用 (2) 至 (5) 式, 估算了 BOX 注氮的 A 系列 MBS 电容的平带电压  $V_{\text{FB}}$  及对应的等效电荷面密度  $N_{\text{eff}}$ , 结果见表 1. 注意表中的  $V_{\text{FB}}$  含有金属-半导体功函数差所引起的接触势差. 在消除了金属-半导体功函数差 (约为 -0.85 eV) 的影响后, 发现未注氮 BOX 所对应的 MBS/ $A_0$  电容的平带电压仅约为 0.15 V. 考虑到实验误差 ( $\pm 0.1 \text{ V}$ ) 的影响, 其数值本身并不具有定量的物理含义. 因此, 表 1 中只能给出 MBS/ $A_0$  电容在最大误差范围内所对应的  $N_{\text{eff}}$  上限. 作为与注氮 BOX 电容样品的比较, 可以认为其对应的  $N_{\text{eff}}$  是非常小的. 这说明原始 BOX 中不存在通常出现于热生长  $\text{SiO}_2$  膜中的那样高密度的氧化物电荷. 图 3(a) 至 (d) 则是对注氮 SIMOX 材料  $A_1$  至  $A_4$  的 SIMS 分析结果.

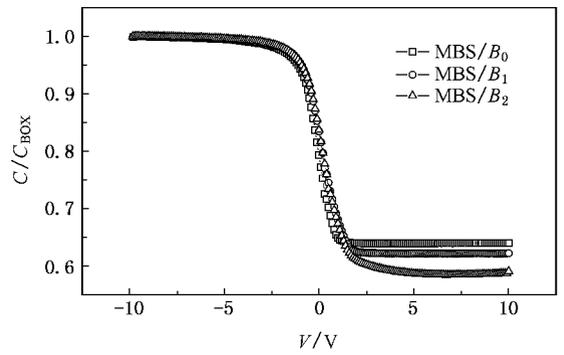
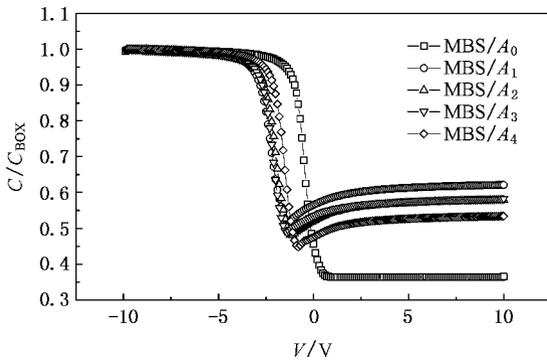


图1 A 系列 MBS 电容样品 1 MHz 下的高频  $C-V$  特性曲线

图2 B 系列 MBS 电容样品 1 MHz 下的高频  $C-V$  特性曲线

表1 A 系列 MBS 电容的平带电压  $V_{FB}$  及对应的等效电荷面密度  $N_{eff}$

| SIMOX | 注氮能量/keV | 注氮剂量/ $10^{15} \text{cm}^{-2}$ | 平带电压 $V_{FB}/V$ | $ N_{eff} /10^{11} \text{cm}^{-2}$ |
|-------|----------|--------------------------------|-----------------|------------------------------------|
| $A_0$ | 0        | 0                              | -0.7            | $\leq 0.5$                         |
| $A_1$ | 110      | 4                              | -2.3            | 2.26                               |
| $A_2$ | 100      | 4                              | -2.2            | 2.14                               |
| $A_3$ | 90       | 4                              | -2.3            | 2.37                               |
| $A_4$ | 80       | 4                              | -1.9            | 1.60                               |

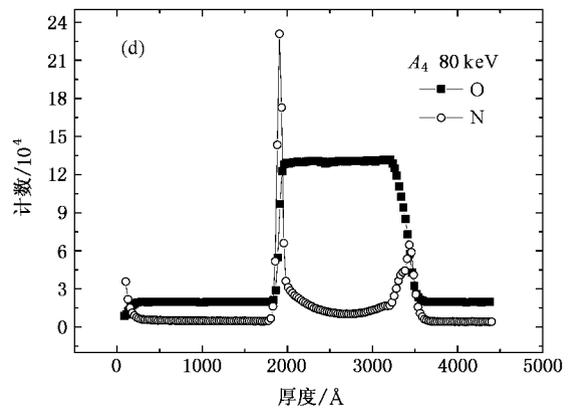
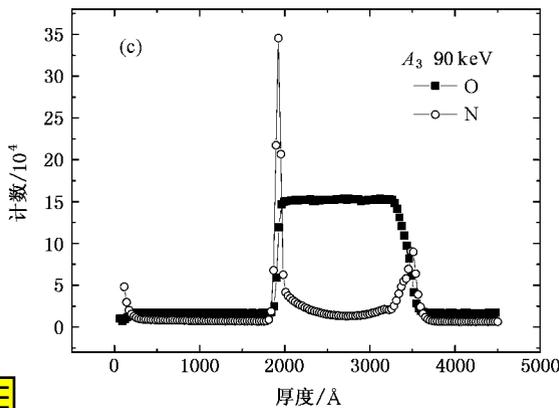
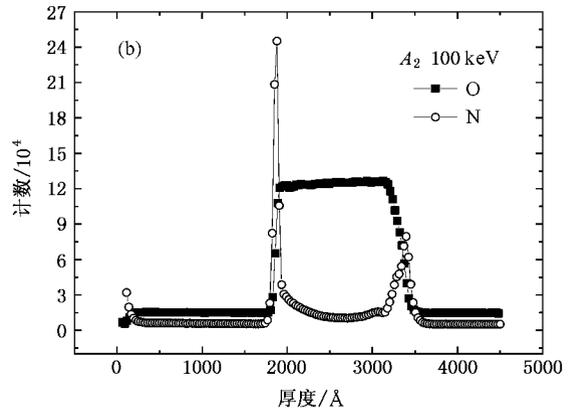
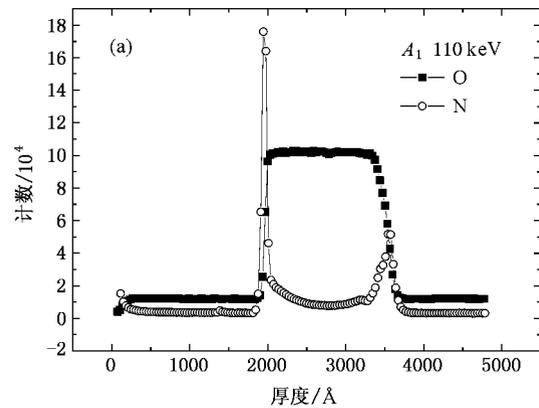


图3 BOX 注氮改性的 SIMOX 材料  $A_1$  至  $A_4$  的 SIMS 分析 (a)  $A_1$  (b)  $A_2$  (c)  $A_3$  (d)  $A_4$

## 4. 讨论与分析

从图 1 可以看到,与 BOX 未注氮的 MBS/A<sub>0</sub> 电容相比,凡 BOX 注氮的 MBS/A<sub>1</sub> 至 MBS/A<sub>4</sub> 电容皆出现了  $C-V$  特性曲线的负向漂移,亦即平带电压  $V_{FB}$  的减小.由(5)式,这意味着注氮 BOX 中正电荷密度的增加.为便于对此现象的机理进行分析,图 4 给出了平带情况下的 p-Si 能带及 BOX/p-Si 界面的陷阱电荷密度  $D_{it}$  分布示意图.图中,  $E_c$  和  $E_v$  分别表示 p-Si 的导带底和价带顶;  $E_F$  和  $E_i$  则分别表示 p-Si 的费米能级与本征费米能级.禁带中,  $E_i$  之上为受主界面陷阱的  $D_{it}$  分布示意图;  $E_i$  之下则为施主界面陷阱的  $D_{it}$  分布示意图.图中看到,在平带情况下, p-Si 费米能级  $E_F$  之上的施主界面陷阱(图中阴影部分)因失去电子而显示正电,成为导致平带电压  $V_{FB}$  负向漂移的因素之一.然而,将图 1 中的 MBS/A<sub>1</sub> 至 MBS/A<sub>4</sub> 电容的  $C-V$  曲线与 MBS/A<sub>0</sub> 电容的  $C-V$  曲线相对照就会发现,前者在发生相对漂移的同时,并没有出现明显的与界面陷阱电荷密度增加相对应的“伸展”畸变.这说明,除金属-半导体功函数差的影响外,引起平带电压  $V_{FB}$  负向漂移的主要因素是 BOX 中固定正电荷密度  $Q_f$  的增加,即对于 BOX 注氮的 A 材料来说,其 BOX 中的固定正电荷密度  $Q_f$  因注氮而增加了.因此,表 1 中给出的  $N_{eff}$  在数值上应近似等于 BOX 中的固定正电荷密度  $Q_f$ .另外,表 1 中 A<sub>1</sub> 与 A<sub>3</sub> 对应着相同的平带电压  $V_{FB}$ ,却计算出不同的  $N_{eff}$  值.其原因是 A<sub>1</sub> 与 A<sub>3</sub> 所对应的  $C_{BOX}$  不同.实际上,与注氮 BOX 对应的 A 系列 MBS 电容的  $C_{BOX}$  之间存在着数值上的差别<sup>[9]</sup>.至于图 1 中 MBS/A<sub>1</sub> 至 MBS/A<sub>4</sub> 电容  $C-V$  曲线在其反型区附近所出现的回折上升现象,可用类 MOS 电容的有效栅面积的“横向扩展效应”<sup>[15]</sup>来解释.这种效应是因为在正对栅以下的 Si 衬底周围存在不受栅压控制的 Si 表面反型层.对 p 型衬底的 MOS 电容来说,该反型层可由热 SiO<sub>2</sub> 膜中的可动正离子和氧化物正电荷所致.所以,注氮 MBS 电容所表现出的“横向扩展效应”也从一个侧面证实了注氮 BOX 中固定正电荷密度的增加.

与上述注氮 BOX 相类似的固定正电荷密度增加也出现在利用热生长 SiO<sub>2</sub> 氮气退火所制备的 Si-O-N 栅介质中.而且,俄歇(Auger)谱分析表明,在靠

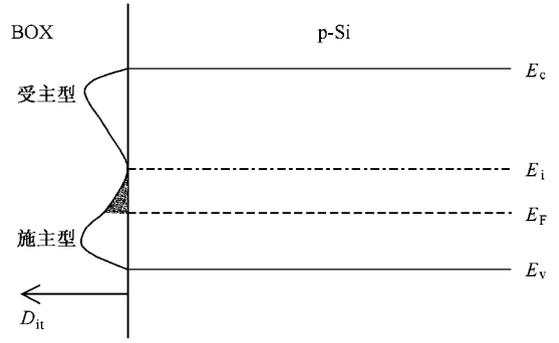


图 4 平带情况下 p-Si 能带及 BOX/p-Si 界面的陷阱电荷密度  $D_{it}$  分布示意图

近 Si-O-N/Si 界面处的 Si-O-N 介质一侧有氮的积累<sup>[16]</sup>.其情形非常类似于图 3 给出的 BOX 注氮改性的 SIMOX 材料 A<sub>1</sub> 至 A<sub>4</sub> 的 SIMS 分析结果.图 3 中清楚地看到,高温退火后,注入到 BOX 中的氮趋向于在 BOX/Si 界面附近进行积累.因此,引起注氮 BOX 中固定正电荷密度增加的一个合理解释是:高温退火引起 BOX 中的注入氮在 BOX/Si 界面附近进行积累,由此促成了 BOX 富氮区中固定正电荷的形成.特别注意到,当与 MBS/B<sub>0</sub> 电容相比较时,发现 BOX 注氮的 MBS/B<sub>1</sub> 及 MBS/B<sub>2</sub> 电容几乎没有出现  $C-V$  曲线的相对漂移,似乎更证实了以上的分析.这是因为材料 B 的 BOX 厚度(约 375 nm)远大于材料 A(约 150 nm),且材料 B 的注氮剂量低于材料 A,因此,尽管没有对注氮的 B 材料进行 SIMS 分析,也可估计出,在相同的退火条件下,材料 B 的 BOX 界面附近的氮积累水平应远低于材料 A,致使其 BOX 中因氮的积累而诱发的固定正电荷显著减少,以至于达到对界面的影响可以忽略的程度.需要注意的是,如果 BOX 中固定正电荷因氮而诱发,其形态就可能不同于通常热生长 SiO<sub>2</sub> 膜中存在的氧化物正电荷.另外,表 1 中还可看到,注氮 BOX 的  $N_{eff}$  值与所对应的注氮能量间没有呈现出简单的关系, A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub> 具有基本相同的  $N_{eff}$  值,而 A<sub>4</sub> 的  $N_{eff}$  明显较小.这一方面可能是由于材料 A 的 BOX 厚度较小,使在一定注氮剂量下的界面附近的氮积累易于达到饱和,从而对 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub> 来说,尽管其 BOX 中的初始氮注入浓度分布因注入能量不同而有差异,但在高温退火过程中,它们能够先后达到界面附近氮积累的饱和,导致出现相近的  $N_{eff}$  值;另一方面则意味着注氮 BOX

中固定正电荷的形成敏感地依赖于氮的浓度.

## 5. 结 论

据以上实验结果和分析讨论,可以得到如下结论:

1. 对于 SIMOX SOI 材料来说,当其 BOX 较薄时,如果将一定剂量的氮注入到 BOX 中,则一定条件下的高温退火将会导致 BOX 中固定正电荷密度的增加.氮在 BOX/Si 界面附近的积累应该是导致注氮 BOX 中固定正电荷大量形成的原因.

2. 当 BOX 较厚时,较低剂量的氮注入及随后所

进行的适当的高温退火将不会引起 BOX 中固定正电荷的明显增加.

3. 在 SIMOX SOI 材料的 BOX 中,不存在通常出现于热生长  $\text{SiO}_2$  膜中的那样高密度的氧化物电荷.

通常认为,热生长  $\text{SiO}_2$  膜中的氧化物电荷由氧化过程中的过剩硅离子所致,而这里注氮 BOX 中的固定正电荷却因氮的注入而引起,因此其形成机理及结构形态皆需进一步研究确定.另外,注氮 BOX 中固定正电荷的密度与 BOX 中氮浓度的关系同样是一个尚待研究解决的问题.

- [ 1 ] Colinge J P 1997 *Silicon-on-Insulator Technology : Materials to VLSI* ( Boston : Kluwer )
- [ 2 ] Jenkins W C , Liu S T 2000 *IEEE Trans . Nucl . Sci .* **47** 2204
- [ 3 ] Dodd P E , Shaneyfelt M R , Walsh D S , Schwank J R , Hash G L , Loemker R A , Draper B L , Winokur P S 2000 *IEEE Trans . Nucl . Sci .* **47** 2165
- [ 4 ] Musseau O 1996 *IEEE Trans . Nucl . Sci .* **43** 603
- [ 5 ] Ferlet-Cavrois V , Gasiot G , Marcandella C , D 'Hose C , Flament O , Faynot O , du Port de Pontcharra J , Raynaud C 2002 *IEEE Trans . Nucl . Sci .* **49** 2948
- [ 6 ] Stahlbush R E , Campisi G J , McKitterick J B , Maszara W P , Roitman P , Brown G A 1992 *IEEE Trans . Nucl . Sci .* **39** 2086
- [ 7 ] Schwank J R , Shaneyfelt M R , Dodd P E , Ferlet-Cavrois V , Loemker R A , Winokur P S , Fleetwood D M , Paillet P , Leray J L , Draper B L , Witezak S C , Riewe L C 2000 *IEEE Trans . Nucl . Sci .* **47** 2175
- [ 8 ] Ferlet-Cavrois V , Quoizola S , Musseau O , Flament O , Leray J L 1998 *IEEE Trans . Nucl . Sci .* **45** 2458
- [ 9 ] Zheng Z S , Liu Z L , Zhang G Q , Li N , Li G H , Zhang E X , Zhang Z X , Wang X 2005 *Semiconductor Science and Technology* **20** 481
- [ 10 ] Zhang E X , Qian C , Zhang Z X , Lin C L , Wang X , Wang Y M , Wang X H , Zhao G R , En Y F , Luo H W , Shi Q 2006 *Chinese Physics* **15** 792
- [ 11 ] Zheng Z S , Liu Z L , Zhang G Q , Li N , Fan K , Zhang E X , Yi W B , Chen M , Wang X 2005 *Acta Phys . Sin .* **54** 348 ( in Chinese ) [ 郑中山、刘忠立、张国强、李 宁、范 楷、张恩霞、易万兵、陈 猛、王 曦 2005 物理学报 **54** 348 ]
- [ 12 ] Zheng Z S , Liu Z L , Zhang G Q , Li N , Fan K , Zhang E X , Yi W B , Chen M , Wang X 2005 *Chinese Physics* **14** 565
- [ 13 ] Nicollian E H and Brews J R 1982 *MOS ( Metal Oxide Semiconductor ) Physics and Technology* ( New York : Wiley )
- [ 14 ] Sze S M 1981 *Physics of Semiconductor Devices* ( New York : Wiley )
- [ 15 ] Nicollian E H , Goetzberger A 1965 *Transact . Electron Devices* **12** 108
- [ 16 ] Pancholy R K , Erdmann F M 1983 *IEEE Trans . Nucl . Sci .* **30** 4141

# Effect of implantation of nitrogen into SIMOX buried oxide on its fixed positive charge density \*

Zheng Zhong-Shan<sup>1)B)</sup> Zhang En-Xia<sup>2)</sup> Liu Zhong-Li<sup>3)</sup> Zhang Zheng-Xuan<sup>2)</sup>  
Li Ning<sup>3)</sup> Li Guo-Hua<sup>3)</sup>

1) *Department of Physics, University of Jinan, Jinan 250022, China*

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

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

( Received 11 December 2006 ; revised manuscript received 7 January 2007 )

## Abstract

In order to obtain greater radiation hardness for SIMOX ( separation by implanted oxygen ) materials , nitrogen was implanted into SIMOX BOX ( buried oxide ). However , it has been found by the *C-V* technique employed in this work that there is an obvious increase of the fixed positive charge density in the nitrogen-implanted BOX with a 150 nm thickness and  $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  nitrogen implantation dose , compared with that unimplanted with nitrogen. On the other hand , for the BOX layers with a 375 nm thickness and implanted with  $2 \times 10^{15}$  and  $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  nitrogen doses respectively , the increase of the fixed positive charge density induced by implanted nitrogen has not been observed. The post-implantation annealing conditions are identical for all the nitrogen-implanted samples. The increase in fixed positive charge density in the nitrogen-implanted 150 nm BOX is ascribed to the accumulation of implanted nitrogen near the BOX/Si interface due to the post-implantation annealing process according to SIMS results. In addition , it has also been found that the fixed positive charge density in initial BOX is very small. This means SIMOX BOX has a much lower oxide charge density than thermal  $\text{SiO}_2$  which contains a lot of oxide charges in most cases.

**Keywords** : SIMOX , buried oxide , nitrogen implantation , fixed positive charge density

**PACC** : 7340Q , 6170T

\* Project supported by the Doctoral Foundation of University of Jinan.