

# 高剂量注氮对注氧隔离硅材料埋氧层中正电荷密度的影响\*

唐海马<sup>1)</sup> 郑中山<sup>1)†</sup> 张恩霞<sup>2)</sup> 于芳<sup>3)</sup> 李宁<sup>3)</sup> 王宁娟<sup>3)</sup> 李国花<sup>3)</sup> 马红芝<sup>3)</sup>

1) (济南大学物理系, 济南 250022)

2) (上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620)

3) (中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(2009年12月28日收到; 2010年7月27日收到修改稿)

为研究注氮改性对注氧隔离硅材料中埋氧层性质的影响, 向其埋氧层内注入了  $10^{16} \text{ cm}^{-2}$  的高剂量氮. 实验结果表明, 与未注氮的埋氧层相比, 所有注氮的埋氧层中的正电荷密度显著增加. 实验还发现, 注氮后的退火可使埋氧层内的正电荷密度进一步上升. 但与注氮导致的埋氧层内正电荷密度的显著上升相比, 退火时间对注氮的埋氧层内正电荷密度的影响不大. 电容-电压测量结果显示, 在埋氧层内部, 注氮后未退火的样品与在  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$  的氮气气氛下退火 2.5 h 的样品相比, 二者具有近似相同的等效正电荷面密度. 然而, 经 0.5 h 退火的样品却对应最高的等效电荷面密度. 为探讨注氮埋氧层内正电荷产生的机理, 对注氮在埋氧层中导致的注入损伤进行了模拟. 模拟结果表明, 氮离子注入在埋氧层内引入了大量的空位缺陷. 对比注氮与退火前后的傅里叶变换红外光谱发现, 注入损伤在经 0.5 h 的高温退火后即可基本消除. 实验还对退火前后的注氮样品进行了二次离子质谱分析. 分析认为, 注入的氮在埋氧层与硅界面附近积累, 导致近界面富硅区的硅-硅弱键断裂是注氮埋氧层内正电荷密度增加的主要原因.

**关键词:** 注氧隔离, 埋氧, 注氮, 正电荷密度

**PACS:** 61.72.U-, 73.40.Ty

## 1. 引言

绝缘体上硅(SOI)是一种新型的硅基材料, 由顶层硅、埋绝缘层(一般为  $\text{SiO}_2$ )及衬底构成. 在使用SOI技术制作的器件中, 因有埋氧层(BOX)将器件和衬底完全隔离, 因而SOI器件有着许多传统的体硅器件所无法比拟的优点. 例如, 与体硅互补金属-氧化物-半导体(CMOS)器件相比, SOI CMOS 功耗低、速度快、抗瞬时辐照能力强, 并可有效消除体硅 CMOS 器件运行过程中可能出现的闩锁效应<sup>[1,2]</sup>. 然而, 在采用注氧隔离(SIMOX)技术制备的SOI材料中, 其BOX内却存在着大量的空穴陷阱. 当使用该材料制作的SOI器件持续工作于电离辐射环境中时, 这些空穴陷阱将俘获辐射诱发的空穴, 导致BOX中正电荷的积累, 出现所谓的总剂量

辐照效应. 当BOX中的正电荷积累到一定程度时, SOI n沟道晶体管的背栅界面将会反型, 致使器件漏电流增加、电特性参数漂移, 并最终失效<sup>[3-5]</sup>. 因此, 相对于体硅器件, SOI器件在抗总剂量辐照能力方面没有优势, 反而因BOX层的存在增加了抗总剂量辐照加固的复杂性.

为提高SIMOX SOI材料的抗辐照能力, 进而提升SOI器件的抗总剂量辐照水平, 可用离子注入方式, 向材料的BOX中注入一定剂量的氟、硅或氮<sup>[6-12]</sup>. 然而, 在向BOX进行离子注入的同时, 不可避免的会对顶层材料造成一定的注入损伤. 尽管这样的损伤可通过注入后的退火基本予以消除, 但遗留的部分缺陷仍会对器件的性能产生一定的影响<sup>[13,14]</sup>. 同样, 离子注入在有效改善BOX抗辐照性能的同时, 必定影响到BOX的内部微观结构, 宏观上表现为BOX电特性的变化, 而这样的变化又可能

\* 济南大学博士基金及上海市教育委员会科研创新项目(批准号:08YZ156)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: zszheng513@163.com

反过来影响到离子注入对材料的抗辐照加固效果. 因此, 必须对 BOX 的离子注入方式加固进行全面的综合评估, 考虑各种因素后, 确定最佳的注入工艺, 包括注入剂量、注入能量、注入后的退火温度与时间等等, 以达到满意的加固效果. 而目前, 尚缺乏对离子注入所引起的 BOX 电特性改变方面的研究. 对 BOX 的离子注入抗辐照加固来说, 在其所有因注入可能引起的电特性变化中, BOX 内电荷密度的改变尤其值得重视. 因为, 如果是 BOX 内的正电荷密度因离子注入而增加, 那么在效果上就等价于辐照后的正电荷积累, 这无疑将对加固效果产生不利影响. 为此, 本文选用 SIMOX SOI 材料, 对其 BOX 实施了高剂量的氮离子注入. 通过电容-电压 ( $C-V$ ) 技术、红外光谱、二次离子质谱 (SIMS) 分析、计算机模拟等, 观察和分析氮注入 BOX 后对其电荷密度的影响及电荷产生机理, 并在同一温度下实施了不同时间的注入后退火, 以观测退火时间对注氮 BOX 的电荷密度变化所起的作用.

## 2. 实验与原理

实验使用的是商业化的标准 SIMOX SOI 晶片. 其 BOX 层厚度为 150 nm, 顶层硅厚度为 190 nm. 制作该类 SOI 材料的初始晶片为 [100] 晶向的 p 型 Si, 其电阻率在 10—20 $\Omega \cdot \text{cm}$  之间. 为便于测量、分析氮离子注入对 BOX 电荷密度产生的影响, 并考虑到高剂量的氮离子注入可以增强该类影响, 实验中向样品材料的 BOX 注入了  $10^{16} \text{ cm}^{-2}$  剂量的氮离子, 注入能量采用优化的 90 keV<sup>[11]</sup>. 氮离子注入过程中, 衬底温度保持在 300  $^{\circ}\text{C}$ . 注入完毕后, 在 1100  $^{\circ}\text{C}$  的  $\text{N}_2$  气氛中进行退火. 标记为  $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5$  的样品, 其注入后的退火时间分别为 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 h. 特别,  $D_1$  注氮后未退火, 以比较退火前后 BOX 内电荷密度的变化. 另外,  $D_0$  作为对照样品而未注氮. 为对样品进行  $C-V$  特性分析, 所有样品材料经反应离子刻蚀 (RIE) 去掉顶层硅, 清洗烘干后, 再经标准的多晶硅栅工艺在 BOX 上制备栅极, 形成多晶硅-埋氧层-半导体 (PBS) 电容结构. 基于  $D_0$ — $D_5$  样品材料的电容分别标记为 PBS/ $D_0$ —PBS/ $D_5$ . 随后, 使用 Keithley 590  $C-V$  分析仪对制备的 PBS 电容进行了高频  $C-V$  特性测量, 测试频率为 1 MHz.

实验制备的 PBS 电容与通常的金属-氧化物-半

导体 (MOS) 电容相比, 区别是用多晶硅栅代替了金属电极, 同时用 BOX 代替了热生长的  $\text{SiO}_2$ , 而二者在结构及电学性质上并无本质的差别. 因此, 对 MOS 电容的  $C-V$  分析理论完全适用于对 PBS 电容的  $C-V$  特性分析. 根据 MOS 电容的  $C-V$  理论<sup>[15]</sup>, 高频 (1 MHz) 信号下, 界面陷阱的充、放电跟不上信号的变化, 故界面态电容为零, 因而 PBS 电容的高频总电容  $C$  满足以下关系:

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

式中,  $C_{\text{BOX}}$  为 BOX 层电容,  $C_s$  为硅衬底表面空间电荷层电容. 于是, PBS 电容的高频平带电容  $C_{\text{FB}}$  可表示为

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

式中,  $C_{\text{sFB}}$  为硅衬底的高频平带电容, 且有

$$C_{\text{sFB}} = S(\epsilon_0 \epsilon_s N q^2 / kT)^{1/2}, \quad (3)$$

其中,  $S$  为多晶硅栅面积,  $\epsilon_0$  为真空电容率,  $\epsilon_s$  为半导体 Si 的相对电容率,  $N$  为杂质掺杂浓度,  $q$  为基本电荷,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  表示温度. 为讨论问题的方便, 将 PBS 电容归一化, 得归一化平带电容  $C'_{\text{FB}}$  为

$$C'_{\text{FB}} = C_{\text{FB}} / C_{\text{BOX}} = 1 / \left[ 1 + \frac{\epsilon_{\text{BOX}}}{\epsilon_s d_{\text{BOX}}} \left( \frac{kT \epsilon_0 \epsilon_s}{q^2 N} \right)^{1/2} \right]. \quad (4)$$

另外, 高频情况下, PBS 系列电容的电容最小值  $C_{\text{min}}$  和最大值  $C_{\text{max}}$  之间满足如下关系<sup>[16]</sup>:

$$C_{\text{min}} / C_{\text{max}} = 1 / \left[ 1 + \frac{\epsilon_{\text{BOX}}}{\epsilon_s d_{\text{BOX}}} \left( \frac{4 \epsilon_0 \epsilon_s kT}{q^2 N} \ln \frac{N}{n_i} \right)^{1/2} \right], \quad (5)$$

式中,  $\epsilon_{\text{BOX}}$  为 BOX 层的相对电容率,  $d_{\text{BOX}}$  为 BOX 层的厚度,  $n_i$  为半导体 Si 的本征载流子浓度. 由 (5) 式, 可求得杂质掺杂浓度  $N$ . 将  $N$  代入 (4) 式, 可得归一化平带电容  $C'_{\text{FB}}$ . 根据测量得到的高频  $C-V$  曲线, 即可得到  $C'_{\text{FB}}$  对应的平带电压  $V_{\text{FB}}$  在 BOX 注氮及退火前后的漂移量  $\Delta V_{\text{FB}}$ . 据此, 可求得 BOX 层的等效电荷面密度的增量  $\Delta N_{\text{eff}}$ :

$$\Delta N_{\text{eff}} = -\Delta V_{\text{FB}} C_{\text{BOX}} / (qS). \quad (6)$$

为了研究探讨 BOX 注氮及退火前后电荷密度的变化机理, 实验还对氮注入在 BOX 中引入的缺陷浓度分布进行了模拟, 并对部分样品进行了 SIMS 和傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 的测量分析.

## 3. 结果与讨论

图 1 是电容样品 PBS/ $D_0$ —PBS/ $D_5$  的典型高频

C-V 特性曲线. 由图看到, 与对照电容样品 PBS/D<sub>0</sub> 相比, 所有注氮电容样品的 C-V 特性曲线皆出现了幅度很大的负向漂移. 根据 MOS C-V 理论, PBS 电容 C-V 曲线的负向漂移是由于 BOX 层内存在正电荷的结果. 所以, 注氮电容样品 C-V 曲线的大幅度负向漂移表明, BOX 层内的正电荷密度因氮离子注入而发生了显著增加. 另一方面, 相对 PBS/D<sub>0</sub> 电容, 注氮电容样品的高频 C-V 曲线除发生负向平移外, 并没有出现明显的“拉伸”畸变, 表明界面陷阱电荷密度并没有因注氮而明显改变. 因此, 相对于 BOX 层内正电荷密度的增加, 界面陷阱电荷密度的变化可以忽略. 基于这样的考虑, 根据 (6) 式, 利用平带电压  $V_{FB}$  的漂移得到的等效电荷面密度增量, 主要反映的是 BOX 内正电荷密度的增加. 表 1 给出了注氮电容样品相对 PBS/D<sub>0</sub> 电容的  $V_{FB}$  漂移量, 以及计算得到的注氮样品的等效电荷面密度增量. 可以看到, 在退火温度为 1100 °C 时, 不同时间的退火并没有对 BOX 层内的正电荷密度的变化起到显著的影响. 特别, 对于注氮后未退火样品 D<sub>1</sub> 来说, 其 BOX 正电荷密度的增量与经历长时间退火的 D<sub>5</sub> 大体相同, 更说明注氮后退火不是导致正电荷增加的主要因素.

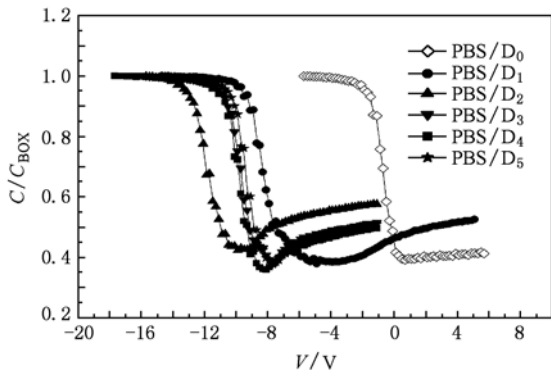


图1 PBS 系列电容样品在 1 MHz 下的典型高频 C-V 曲线

表 1 注氮前后 PBS 电容的  $V_{FB}$  增量及 BOX 等效正电荷面密度增量

电容样品	退火时间/h	$\Delta V_{FB}/V$	$\Delta N_{eff}/10^{11} \text{ cm}^{-2}$
PBS/D <sub>1</sub>	0	-8.45	5.82
PBS/D <sub>2</sub>	0.5	-11.05	7.61
PBS/D <sub>3</sub>	1.0	-9.16	6.31
PBS/D <sub>4</sub>	1.5	-9.45	6.51
PBS/D <sub>5</sub>	2.5	-8.95	6.16

至于电容 PBS/D<sub>1</sub>—PBS/D<sub>5</sub> 的 C-V 曲线在衬底

反型栅压附近出现的“翘曲”, 可用栅的“横向扩展效应”<sup>[17]</sup>进行解释, 即由于 BOX 层内正电荷的大量增加, 使得衬底 Si 表面反型, 因而出现了超出栅面积且不受栅压控制的反型层, 于是, 导致反型时栅的有效面积增加, 引起电容上升.

为分析注氮 BOX 正电荷密度增加的原因, 对注氮导致的 BOX 内氧空位及硅空位缺陷浓度分布进行了模拟, 结果如图 2 所示. 据此, 如果假定注氮 BOX 内的正电荷增加主要来自于注氮引入的空位缺陷, 或与空位缺陷密切相关, 那么, 利用 MOS C-V 理论计算的结果表明, 在退火消除这些空位缺陷之前, 注氮 PBS 电容的  $V_{FB}$  负向漂移可高达 170V 左右. 这明显与实验不符. 实验结果是, 基于注氮未退火样品 D<sub>1</sub> 的 PBS/D<sub>1</sub> 电容的  $V_{FB}$  负向漂移仅 9 V 左右. 进一步, 图 3 给出的 D<sub>0</sub>, D<sub>2</sub> 样品的傅里叶变换红外光谱显示, 高温退火可基本消除注氮引入的硅氧空位等缺陷. 在图 3 中, 波数 1050  $\text{cm}^{-1}$  与 Si—O 键相对应<sup>[18]</sup>. 对照 D<sub>0</sub>, 注氮未退火样品 D<sub>1</sub> 在 1050  $\text{cm}^{-1}$  附近的红外吸收率明显降低, 意味着有大量的硅氧空位等缺陷因注氮而产生. 退火后的样品 D<sub>2</sub> 的红外谱则基本恢复到对照样品 D<sub>0</sub> 的水平. 因此, 如果注氮引入的硅氧空位等缺陷是 BOX 内正电荷产生的主要原因, 同时, 退火又可基本消除这些缺陷, 则注氮 BOX 内正电荷的密度必将因注氮后的退火而明显下降. 但从表 1 看到, 相对于 PBS/D<sub>1</sub> 电容, 基于退火样品材料的 PBS/D<sub>2</sub>—PBS/D<sub>5</sub> 电容的  $V_{FB}$  绝对值未减反增, 意味着注氮后的退火导致了注氮 BOX 内的正电荷密度进一步上升, 而非下降. 由此说明, 注氮引入的硅氧空位等缺陷不是导致注氮 BOX 内正电荷密度大幅提高的主要因素.

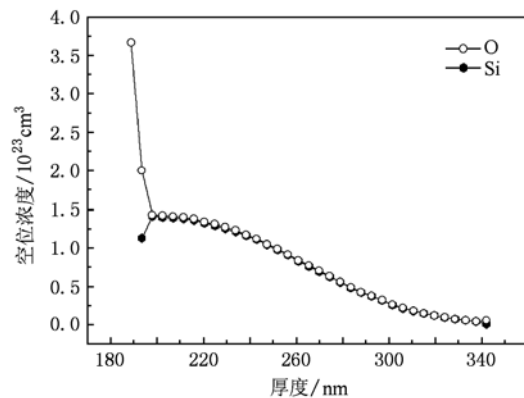


图2 注氮在 BOX 中产生的 Si, O 空位浓度分布模拟

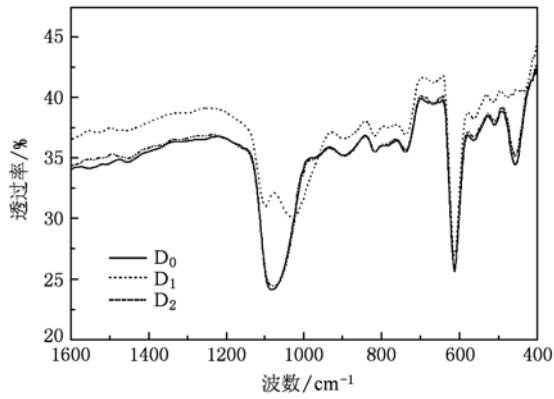


图3  $D_0, D_2$  的傅里叶变换红外光谱

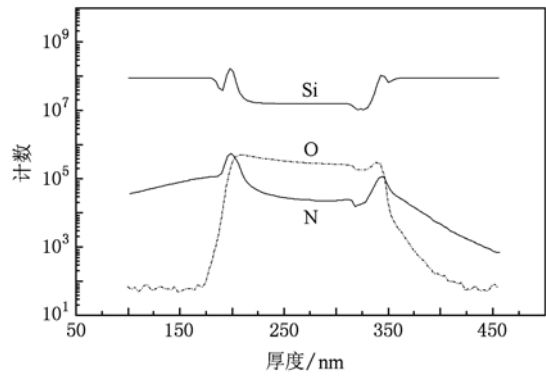


图4 注氮未退火样品  $D_1$  的 SIMS 分析

图4和图5分别给出了样品  $D_1$  和  $D_2$  的 SIMS 分析结果. 由图4可见, 在氮离子注入样品还尚未实施退火时, 就已出现注入的氮元素在 BOX/Si 界面附近堆积的现象, 且其堆积的浓度分布曲线与 BOX 内近界面附近约 20 nm 范围的硅浓度分布的上升曲线基本一致. 图5给出的退火样品  $D_2$  的 SIMS 分析结果与图4相似, 只是氮在界面附近的堆积程度因退火而提高. 至此, 对于注氮导致的 BOX 内正电荷密度的增加可做如下解释: 在界面附近, 因 BOX 内硅浓度的上升, 使其内部结构偏离了正常的  $\text{SiO}_2$  原子配比. 硅氧原子数的不匹配及相对过剩硅的存在必引起晶格结构的畸变, 导致存在大量的 Si—Si 畸变键, 且这些键的键能因键的畸变而减小. 当注入的氮离子在此区域聚集并与硅或氧结合时, 加大了界面附近的应力, 致使畸变的 Si—Si 弱键断裂, 并释放出原成键的电子, 成为正电荷中心. 如此, 该类正电中心就不同于通常热生长二氧化硅中的过剩硅离子<sup>[19]</sup>. 退火后, 氮在 BOX 中的再分布使之在界面附近的聚集程度进一步提高, 导致更多 Si—Si 畸变键的断裂, 因而, 产生了更多的正电中心. 亦即, 氮在界面附近的集聚所导致的 Si—Si 弱键的断裂应是 BOX 中正电荷大量产生的主要因素.

另外, 还可注意到, 图4、图5中的 BOX 界面处的硅含量首先出现一个较小的低谷, 然后才是与界面附近氮积累相对应的尖峰. 这是因为紧邻界面处, 氧含量仍高于氮含量, 因此, 该处大部分的硅原子仍将与氧原子结合, 并导致硅的浓度降低. 同时, 因界面附近存在氧的浓度梯度, 所以形成了与氧浓度分布相对应的硅含量低谷. 但界面附近区域中的氧含量又不足以与硅原子形成具有标准原子配比的  $\text{SiO}_2$  结构, 结果是该处的硅浓度虽然降低, 但仍

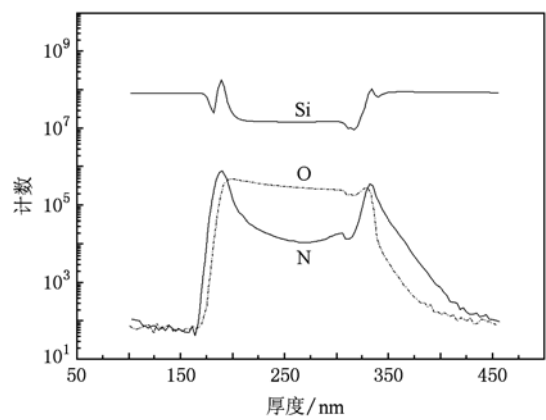


图5 注氮退火样品  $D_2$  的 SIMS 分析

高于 BOX 体内.

至于随退火时间的增加而出现的  $V_{\text{FB}}$  漂移有所减少的现象, 有两种可能的原因. 一种原因是, BOX 中的少量正电荷来源于注氮导致的注入损伤, 且随退火时间的增加, 部分正电中心将因损伤的修复而消失. 其根据是, 氮注入前的 BOX 界面附近已因晶格结构的变化而存在着界面应力, 并因此导致 Si—Si 应变弱键的出现. 在半导体辐照效应理论中, 这样的应变弱键将会因辐照而断裂, 并成为携带正电的所谓  $E'$  中心<sup>[20]</sup>. 在针对 BOX 的注氮过程中, 注氮所引起的 BOX 界面附近的原子位移损伤将直接或间接的导致 Si—Si 应变弱键的断裂, 并使之成为带正电的类  $E'$  中心. 随着退火时间的延长, 这些损伤将会部分消除, 因此使正电荷密度降低、 $V_{\text{FB}}$  漂移减少; 另一种原因与上述描述的 BOX/Si 界面及其附近的行为密切相关. 具体为, 注入的氮随退火时间的延长, 其在界面附近的浓度分布也必将随之再次发生变化. 这将导致材料在界面及其附件的微观

结构重组和界面应力的再分布. 那么, 在此之前因注氮而断裂的部分 Si—Si 应变弱键, 或说正电中心, 就有可能在此结构重组过程中得以修复或消失, 从而使正电中心减少,  $V_{FB}$  漂移减弱. 实际过程中, 因上述两种原因在同一区域同时存在, 共同发挥作用, 将不可避免地相互影响. 当共同作用的结果表现为正电中心密度下降, 则  $V_{FB}$  漂移减少. 而对此正电中心的详细结构、具体性质等更为深入的认识与理解尚需进一步的研究.

#### 4. 结 论

实验结果表明, 对 SIMOX SOI 材料的 BOX

进行注氮改性, 将导致 BOX 中正电荷密度的增加, 特别是在高剂量注氮的情况下, 其正电荷密度增长的幅度是非常之大的. 因此, 在对该类材料进行注氮改性时, 应将注氮剂量控制在一个合适的较低范围内, 以免对器件性能及加固效果造成负面影响. 分析认为, 注氮 BOX 中正电荷密度的增加主要是由于界面附近 BOX 中 Si—Si 弱键断裂后形成正电荷中心的结果, 而这些弱键的断裂又是由于氮在界面附近的堆积所引起的. 另外, 实验还显示, 与注氮前后 BOX 中正电荷密度的显著增加相比, 注氮后的退火及不同的退火时间并没有对 BOX 中的正电荷密度产生十分明显的影响.

- [1] Kuo J B, Lin S C 2001 *Low-Voltage SOI CMOS VLSI Devices and Circuits* (New York: Wiley)
- [2] Kuo J B, Su K W 1998 *CMOS VLSI engineering: silicon-on-insulator (SOI)* (New York: Kluwer Academic Publishers)
- [3] Wei H F, Chung J E, Annamalai N K 1996 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **43** 1200
- [4] Schwank J R, Ferlet-Cavrois V, Shaneyfelt M R, Paillet P, Dodd P E 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 522
- [5] Ferlet-Cavrois V, Quoizola S, Musseau O, Flament O, Leray J L 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 2458
- [6] Yang H, Zhang E X, Zhang Z X 2007 *Chin. J. Semi.* **28** 323
- [7] Wang N J, Li N, Liu Z L, Zhang G Q, Yu F, Zheng Z S, Li G H 2007 *Journal of Functional Materials and Devices* **13** 426
- [8] Li N, Zhang G Q, Liu Z L, Fan K, Zhang Z S, Lin Q, Zhang Z X, Lin C L 2005 *Chin. J. Semi.* **26** 349 (in Chinese) [李宁、张国强、刘忠立、范楷、郑中山、林青、张正选、林成鲁 2005 半导体学报 **26** 349]
- [9] Yi W B, Zhang E X, Chen M, Li N, Zhang G Q, Liu Z L, Wang X 2004 *Semicond. Sci. Tech.* **19** 571
- [10] Zheng Z S, Liu Z L, Zhang G Q, Li N, Li G H, Ma H Z, Zhang E X, Zhang Z X, Wang X 2005 *Semicond. Sci. Tech.* **20** 481
- [11] Zhang E X, Sun J Y, Chen J, Zhang Z X, Wang X 2005 *J. Electron. Mater.* **34** 153
- [12] 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 *Chin. Phys.* **15** 792
- [13] 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、范凯、张恩霞、易万兵、陈猛、王曦 2005 物理学报 **54** 348]
- [14] Zheng Z S, Liu Z L, Zhang G Q, Li N, Fan K, Zhang E X, Yi W B, Chen M, Wang X 2005 *Chin. Phys.* **14** 565
- [15] Nicollian E H, Brews J R 1982 *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and technology* (New York: Wiley)
- [16] Sze S M 1981 *Physics of semiconductor Devices* (New York: Wiley)
- [17] Nicollian E H, Goetzberger A 1965 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **12** 108
- [18] Gupta G K, Yadav A D, Gundu Rao T K, Dubey S K 2000 *Nucl. Instrum. Meth. B* **168** 503
- [19] Deal B E, Sklar M, Grove A S, Snow E H 1967 *J. Electrochem. Soc.* **114** 266
- [20] Lelis A J, Oldham T R, Boesch H E, Jr McLean F B 1989 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **36** 1808

# Influence of high-dose nitrogen implantation on the positive charge density of the buried oxide of silicon-on-insulator wafers \*

Tang Hai-Ma<sup>1)</sup> Zheng Zhong-Shan<sup>1)†</sup> Zhang En-Xia<sup>2)</sup> Yu Fang<sup>3)</sup>  
Li Ning<sup>3)</sup> Wang Ning-Juan<sup>3)</sup> Li Guo-Hua<sup>3)</sup> Ma Hong-Zhi<sup>3)</sup>

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

2) (College of Material Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

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

(Received 28 December 2009; revised manuscript received 27 July 2010)

## Abstract

The influence of nitrogen implantation on the properties of silicon-on-insulator buried oxide using separation by oxygen implantation was studied. Nitrogen ions were implanted into the buried oxide layer with a high-dose of  $10^{16} \text{ cm}^{-2}$ . The experimental results showed that the positive charge density of the nitrogen-implanted buried oxide was obviously increased, compared with the control samples without nitrogen implantation. It was also found that the post-implantation annealing caused an additional increase of the positive charge density in the nitrogen implanted samples. However, annealing time displayed a small effect on the positive charge density of the nitrogen implanted buried oxide, compared with the significant increase induced by nitrogen implantation. Moreover, the capacitance-voltage results showed that the positive charge density of the unannealed sample with nitrogen implanted is approximately equal to that of the sample annealed at  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$  for 2.5 h in  $\text{N}_2$  ambient, despite an additional increase brought with annealing, and the buried oxide of the sample after 0.5 h annealing has a maximum value of positive charge density. According to the simulating results, the nitrogen implantation resulted in a heavy damage to the buried oxide, a lot of silicon and oxygen vacancies were introduced in the buried oxide during implantation. However, the Fourier transform infrared spectroscopy of the samples indicates that implantation induced defects can be basically eliminated after an annealing at  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$  for 0.5 h. The increase of the positive charge density of the nitrogen implanted buried oxide is ascribed to the accumulation of implanted nitrogen near the interface of buried oxide and silicon, which caused the break of weak Si – Si bonds and the production of positive silicon ions in the silicon-rich region of the buried oxide near the interface, and this conclusion is supported by the results of secondary ion mass spectrometry.

**Keywords:** separation by oxygen implantation, buried oxide, nitrogen implantation, positive charge density

**PACS:** 61.72. U – , 73.40. Ty

\* Project supported by the Doctoral Foundation of University of Jinan and Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission (Grant No. 08YZ156).

† Corresponding author. E-mail: zszheng513@163.com