

大剂量氧离子注入形成 SOI 结构的研究*

陈南翔 苗伟 王忠烈* 黄敞**

(北京师范大学低能核物理研究所)

(*山东大学物理系,济南)

(**航天部骊山微电子公司,陕西临潼)

1988年4月11日收到

本文利用背散射分析技术、扩展电阻测量、高能电子衍射及超高压透射电镜研究了注氧后埋 SiO_2 层的形成过程以及顶部剩余硅的退火行为。通过沟道背散射分析技术与霍尔测量,给出了在不同退火条件下顶部剩余硅的单晶结晶度及霍尔迁移率。结果表明: 150 keV 下注入 $1.8 \times 10^{16} \text{ O}^+/\text{cm}^2$, 经 1250°C 2h 退火后, 表面剩余单晶硅厚度约为 1600—1900 Å, 埋 SiO_2 层厚度为 3000—3500 Å。同时, 采用高温注入对于埋 SiO_2 层性能的改善以及顶部剩余硅的单晶恢复均是非常必要的。

主题词: SOI 结构, 顶部剩余硅, 氧沉淀, 背散射分析技术, 损伤恢复

一、前言

在 SOI 衬底上制备的器件具有速度快、密度高、抗辐射能力强以及隔离电压高等优点。尤其是在 CMOS 器件制作中采用 SOI 技术后, 便可从根本上消除 CMOS 器件的栓锁效应。因此作为 SOS 技术的一种切实可行的替代方法, SOI 技术近年来得到了迅速的发展。

本文采用向本体硅中注入大剂量氧离子的方法来形成 SOI 结构。并就埋 SiO_2 层的合成过程以及表面剩余硅的单晶恢复进行了分析与研究。

二、实验条件

选用的衬底材料为 P 型 (100) CZ 硅单晶, 电阻率为 20—30 $\Omega \cdot \text{cm}$ 。注入能量 150 keV, 在该能量下, 氧离子的射程 R_p 约为 3710 Å, 其标准偏差 ΔR_p 约为 980 Å¹¹。注入剂量分别为 $1.8 \times 10^{16} \text{ O}^+/\text{cm}^2$ 及 $2 \times 10^{16} \text{ O}^+/\text{cm}^2$ 。

三、实验结果与讨论

1. 埋 SiO_2 层的形成

* 此工作受到中国科学院表面物理开放实验室资助。

图 1 给出了约 100℃ 下 O^+ 注入 ($2 \times 10^{18} cm^{-2}$) 的随机背散射能谱。由图中可见：在原始注入的样品中，氧分布基本上呈高斯分布。在退火之后，氧的再分布是非常明显的。随着退火温度升高或时间增长，氧均匀分布区增宽，氧分布边缘斜率变大，同时与原始注入相比，整个含氧的区域却减小。这些变化给我们提供了这样一个氧注入合成 SiO_2 层的过程：原始氧分布为高斯型的注入样品，在退火期间，氧分布峰值处首先形成氧沉淀结团^[2] (SiO_x)，尔后在峰值两侧的氧要向该沉淀区聚集，即形成了氧向分布中心扩散的现象。退火过程的延续，导致了沉淀结团的增大，同时氧沉淀从 SiO_x 趋于 SiO_2 。最后由于高密度的沉淀相互连续而形成 SiO_2 层。正是由于上述的物理过程，注入形成埋 SiO_2 层与热生长 SiO_2 层相比，其 Si/SiO_2 界面特性较差，存在一个较厚的 SiO_2 的过渡区。

根据背散射谱，由下式就可求出注入区中氧、硅的组分比例及其分布：

$$\frac{N_o}{N_{Si}} = \frac{\sigma_{Si}}{\sigma_o} \cdot \frac{H_o}{H_{Si}} \cdot \frac{[s]^{Si}}{[s]^o} \quad (1)$$

式中： N_o 、 N_{Si} 分别为注入区中某一深度处的氧硅原子密度， σ_o 、 σ_{Si} 分别为氧、硅的微分散射截面， H_o 与 H_{Si} 分别为背散射谱上某一深度的氧硅峰高度。 $[s]^{Si}$ 、 $[s]^o$ 为 SiO_2 中硅、氧的背散射因子。我们对图 1(c) 中的背散射进行了换算，所得出的氧硅原子比的深度分布如图 2 所示： $O/Si \approx 2$ 。我们还用俄歇能谱 (AES) 进行分析，得出了与上述相同的实验结果，故不一一累述。

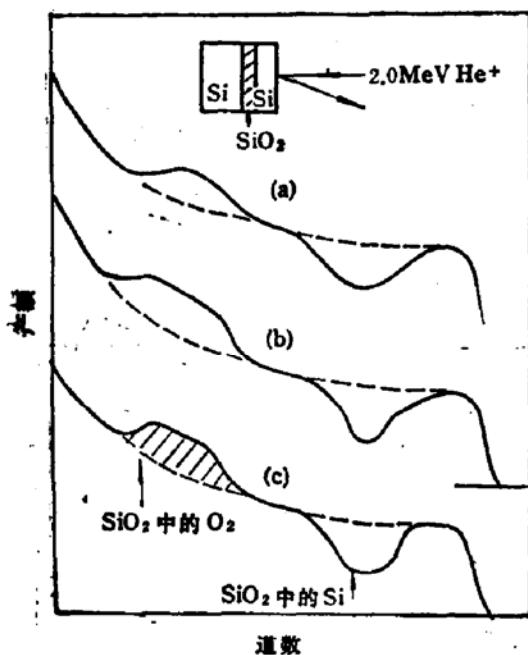


图 1 退火前后的背散射谱
 $\sim 100^\circ C$ 注入, $2.0 \times 10^{18} cm^{-2}$
(a) 原始注入 (b) $1100^\circ C$ 6h 退火
(c) $1100^\circ C$ 6h + $1400^\circ C$ 10min 退火

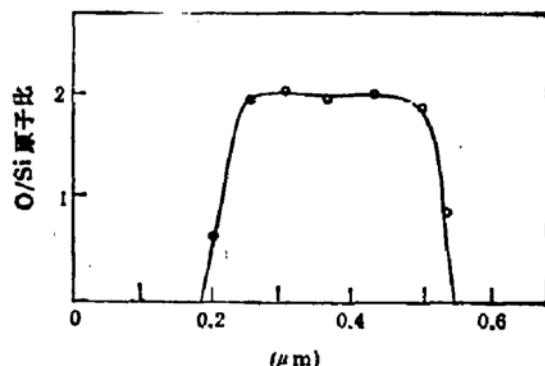


图 2 图 1(c) 样品的氧硅组分比深度分布

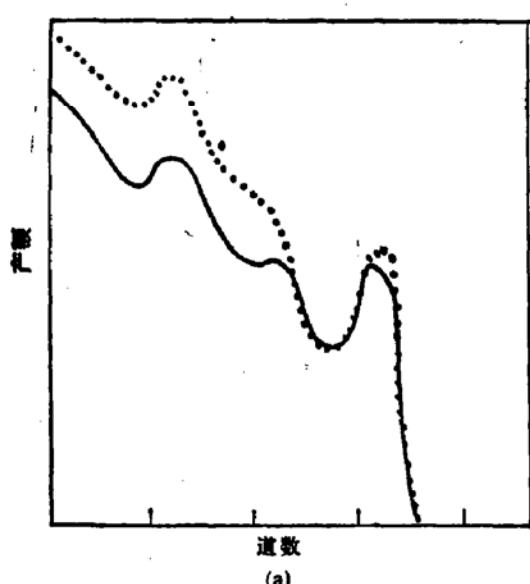
2. 注入温度对 SOI 结构性能的影响

通过大剂量氧注入形成的 SOI 结构中，注入后在顶部剩余硅中将产生严重的辐射损伤。辐射损伤的恢复乃是氧注入 SOI 技术中至为关键的一步。由于退火时要形成无定形的 SiO_2 埋层，顶部剩余硅中的损伤只能借助于从表面开始的固相外延来得以恢复^[3]。因此，注入期间保持表面硅的单晶性质是非常重要的。由此不难看出，注入期间衬底温度

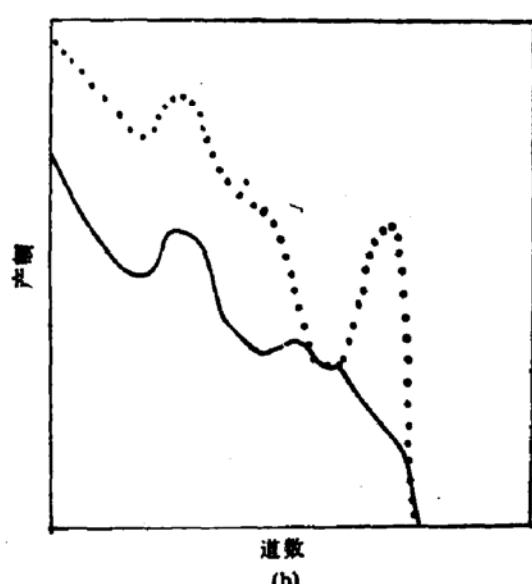
对整个 SOI 材料形成的影响^[4]。

我们进行了这样的实验,一类样品通过碘钨灯照射来升温注入 ($T_i \approx 500^\circ\text{C}$). 另一类样品不附加升温,(但注入时束流轰击也要产生一定的温度,此种情况下衬底温度与束流密度、靶室材料的散热等关系很大, $T_i \approx 100^\circ\text{C} - 200^\circ\text{C}$). 用沟道背散射能谱及剖面透射电镜来分析这两类样品以研究注入温度不同的影响. 其结果如图 3、图 4 中所示.

就原始注入而言, 图 3(a) 及图 4(a) 表明: 表面均存在一个高损伤的单晶区. 在



(a)



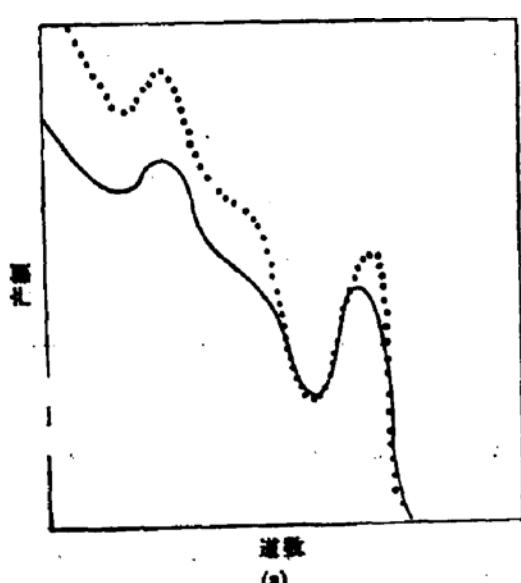
(b)

(a) 原始注入的沟道背散射谱

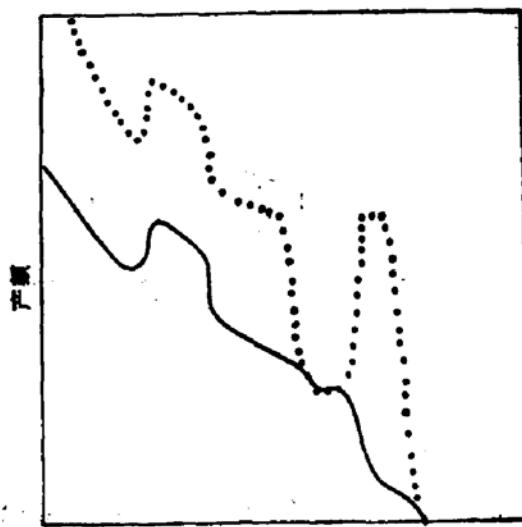
(b) 退火后的沟道背散射谱

图 3 注入温度对 SOI 结构的影响

$T_i: 100-200^\circ\text{C}, 1.8 \times 10^{14} \text{ O}^+/\text{cm}^2$, 随机谱 —— 定向谱



(a)



(b)

(a) 原始注入的沟道背散射谱

(b) 退火后的沟道背散射谱

图 4 高温注入对 SOI 结构的影响

$T_i: 500^\circ\text{C}, 1.8 \times 10^{14} \text{ O}^+/\text{cm}^2$, 随机谱 —— 定向谱

500℃的高温注入下的表面损伤明显地要比100℃—200℃时的要少。这说明: 在大剂量注入时, 高衬底温度所带来的自退火效应对维持表面硅的单晶性质是非常有效的。图3(b)及图4(b)表明: 在同样的退火条件下(1250°C 2h N_2), 500℃注入的样品其沟道背散射谱给出的最小产额为14%, 而100℃—200℃注入的样品, 该 χ_{\min} 值约为33%。可以看出, 高温注入有利于注入损伤的恢复。

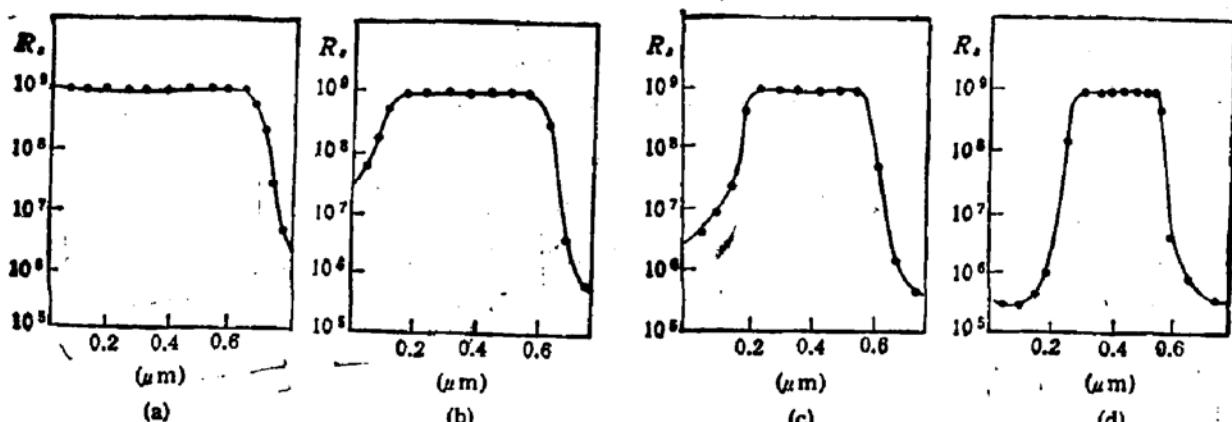
图3(b)及图4(b)中还反映出: 高温注入的样品(500℃), 退火后其氧均匀分布区较宽, 整个氧分布区较窄, 并且其界面处氧分布很陡。这些结果表明: 高温注入有助于形成更厚的 SiO_2 埋层及较窄的 Si/SiO_2 界面过渡区。

图3(c)及图4(c)为SOI结构的剖面透射电镜照片($25000\times$)*, 其结果是与沟道背散射谱的结果相吻合的。此外, 在两种注入温度的样品中, 埋氧化层与体硅交界处均显示出了高密度、大颗粒的氧沉淀(其与三-1中所述埋 SiO_2 层合成过程是自洽的)。

从高温注入(500℃)样品的透射电镜结果(图4(c))可以看出一个完整的、各个界面清晰的SOI结构。在该样品的注入及退火条件下, 可以得到 1900 \AA 厚的顶部剩余硅及 3400 \AA 的埋氧化层。

3. 高剂量氧注入后的辐射损伤恢复

我们采用扩展电阻测量与高能电子衍射相结合的方法来研究不同退火时间下的顶部剩余硅中损伤的恢复过程。图5分别给出扩展电阻及电子衍射的测量结果, 该样品注入条件是: $\text{Ti}=400^{\circ}\text{C}$, 剂量 $2\times 10^{18}/\text{cm}^2$, 150keV。退火温度 1170°C , 退火时间60min—180min。



(a) 原始注入的扩展电阻 (b) $1170^{\circ}\text{C}, 60'$ 的 SRM (c) $1170^{\circ}\text{C}, 90'$ 的 SRM (d) $1170^{\circ}\text{C}, 180'$ 的 SRM
图5 顶部硅中辐射损伤的恢复

原始注入样品的顶部剩余硅呈高阻态(图5(a))这是由于顶部剩余硅受到一定程度的损伤所致。电子衍射结果表明: 原始注入样品的硅表面为非晶状态(图5(a'))。经过 1170°C 60min退火后, 表面高阻开始降低, 并且表面呈不完全多晶与单晶的镶嵌结构(图5(b)(b'))。 90min 退火后, 整个顶部硅继续向低阻降低, 虽然电子衍射照片表明表面硅仍属多晶与单晶的镶嵌结构, 但单晶衍射斑点明显增多(图5(c)(c'))。经过 180min 退火

* 图3(c), 图4(c)见图版 I. 图5(a')(b')(c')(d')见图版 II.

后,扩展电阻测量给出了分布均匀并与原始单晶材料相同的 R_s 值,同时电子衍射图上多晶衍射环消失,出现了明显的菊池线等(图 5(d)(d')).这些结果表明:顶部剩余硅层中损伤已得到了恢复。

由上可以看出,高剂量氧注入样品的退火是从表面处开始的一种固相外延过程。在退火期间,顶部剩余硅经历了从非晶至多晶最终为单晶的相变过程。

表 1 给出在不同的退火温度下的顶部硅层中霍尔测量结果。

表 1 不同退火温度的 μ_{HP} ($T_f = 100-200^\circ\text{C}$, $1.8 \times 10^{18}\text{O}^+/\text{cm}^2$)

迁移率 退火条件	1150°C 2h	1200°C 2h	1250°C 2h
$\mu_{HP}(\text{cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	170	230	260

四、结 论

在 SOI 结构形成中,高温注入对于表面剩余硅的损伤恢复以及埋氧化层与本体硅间界面特性的改善均是非常必要的。

高剂量氧离子注入后的退火对于埋 SiO_2 层的形成以及顶部硅中的损伤恢复均是必要的。在退火过程中,从表面处发生的固相外延过程使得顶部硅中损伤得以恢复,并且经历了从非晶→多晶→单晶的相变过程。

对于 500°C 衬底温度注入 $1.8 \times 10^{18}\text{O}^+/\text{cm}^2$ 的样品,经过 1250°C 2h 退火后便可获得质量较好的 SOI 结构。其沟道背散射谱给出 14% 的表面最小产额。无氧沉淀的单晶区为 1700 Å, 埋氧化层厚为 3400 Å, 霍尔空穴迁移率约为 $280-290\text{cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此种 SOI 材料已达到支持外延层生长及电路制作的要求。

在本文的研究过程中,作者得到了北师大低能所加速器室陈如意老师的大力协助,离 子束室卢武星副教授就本文工作曾给予极大的帮助。作者对上述同志表示衷心地感谢。

参 考 文 献

- [1] J. F. Gibbons, Projected Range Statistics, (1975).
- [2] D. M. Maher, *J. Appl. Phys.*, 47, 3813(1976).
- [3] R. Pinizzotto, *Proc. Mat. Res. Soc.*, 27, 265(1984).
- [4] P. L. F. Hemment, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 133, 41(1984).

Study of SOI Structure Formed by High Dose Oxygen Implantation

Chen Nanxiang, Miao Wei, Wang Zhonglie*, Huang Chang**

(Inst. of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University)

(*Department of Physics, Shandong University, Jinan)

(**Shaanxi LiShan Micro-Electronics Institute, Lintong)

Abstract

We have investigated the process of ion beam synthesis of buried SiO_2 layer, and the annealing of top silicon layer by RBS, SRM, RHEED and Cross-sectional HV TEM. These results show that, for the sample implanted 150 keV atomic oxygen to a dose of $1.8 \times 10^{18}/\text{cm}^2$, the thickness of top silicon was between 1600—1900 Å after post-annealing at 1250°C for 2h, the thickness of buried SiO_2 layer was between 3000—3500Å. Otherwise, implanting at high substrate temperature is necessary for improving the properties of SiO_2 layer and restoration of damage in the top silicon.

KEY WORDS: Silicon on Insulator Top silicon, Oxygen precipitation, Backscattering spectrometry, Restoration of damage