

# 具有复合理层的新型SIMON材料的制备\*

易万兵<sup>1</sup> 陈 猛<sup>1,2</sup> 张恩霞<sup>1</sup> 刘相华<sup>3</sup> 陈 静<sup>1</sup> 董业民<sup>1</sup> 金 波<sup>1</sup> 刘忠立<sup>4</sup> 王 曜<sup>1,2</sup>

(1) 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 离子束重点实验室, 上海 200050)

(2) 上海新傲科技有限公司, 上海 201821)

(3) 香港中文大学电子工程系, 香港)

(4) 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘要:** 采用氮氧共注入方法制备了新型的SIMON(separation by implanted oxygen and nitrogen) SOI材料。采用不同的制备方法分别制作出样品并进行了结构测试和分析,发现SIMON材料的结构和质量对注入条件和退火工艺非常敏感。并对各种氮氧复合注入技术做了分析和比较,发现氮氧分次注入可以得到更好的结构和性能。

**关键词:** SIMON; SOI; 氮氧共注入

**PACC:** 8100

中图分类号: TN 304. 05

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)07-0814-05

## 1 引言

SOI(silicon on insulator)技术被誉为21世纪的硅基集成电路技术,它不仅具有高速、低功耗等优点,而且由于引入了氧化隔离层,在瞬态效应和单粒子翻转效应上相对体硅有明显的改良,抗辐射能力出色,但在总剂量效应方面SOI材料相对体硅并无明显优势。Lee等人<sup>[1]</sup>在热氧化SiO<sub>2</sub>上沉积SiN<sub>x</sub>薄膜,而后制作出的MNOS(metal-nitride-oxide-semiconductor)电容具有优良的抗总剂量辐照能力。受此启发,我们采用氮氧离子共注入的方法制备了多埋层SIMON材料,与中国科学院半导体研究所合作进行抗辐射实验,发现与传统SIMOX(separation by implanted oxygen)相比,这种具有氮氧复合理层结构的新型SOI材料对总剂量效应的承受能力有大幅提高<sup>[2,3]</sup>。另外很重要的一点,氮氧多埋层SOI材料可以降低传统SOI器件固有的自加热效应<sup>[4]</sup>,Smart-Cut和ELTRAN技术也可以用来制备氮氧多埋层SOI材料(一般称为SOIM,silicon on insulating multi-layers)<sup>[5]</sup>。本文主要对离子注入形成SIMON材料的不同制备方法做了比较和分析。

## 2 实验

SIMON材料的形成是一个极为复杂的多相热力学与多元素化学作用过程,注入条件以及退火工艺的选取和搭配均对材料的结构和性能有相当大的影响。若单纯考虑简单注入(选定的离子剂量均一次注完),制备方法主要有:

(a) 分别注入不同能量、剂量搭配的氮氧离子,一次性退火;

(b) 选定能量、剂量配比,注入氮离子并退火,再注入氧离子并退火;

(c) 选定能量、剂量配比,注入氧离子并退火,再注入氮离子并退火。

样品S<sub>a</sub>, S<sub>b</sub>, S<sub>c1</sub>和S<sub>c2</sub>为制得的SIMON材料样品,其中下标a, b, c分别对应上面相应的制备方法。各样品的具体制备条件见表1。S<sub>c1</sub>和S<sub>c2</sub>采用上海新傲科技有限公司的150mm SIMOX片为起始片,意味着已经完成制备方法(c)中的第一步——注入氧离子并退火,这为我们实验带来了很大的方便。

用截面透射电子显微镜(XTEM, cross-sectional transmission electron microscopy)和高分辨透射

\* 国家杰出青年基金资助项目(批准号: 59925205)

2003-07-06 收到, 2003-10-15 定稿

©2004 中国电子学会

电子显微镜(HRTEM, high-resolution TEM)观察样品微结构;用二次离子质谱(SIMS, second ion

mass spectroscopy)测试高温退火后样品中的氮、氧浓度分布.

表1 各样品的具体制备条件

Table 1 Details of fabrication conditions of samples

Sample	S <sub>a</sub>	S <sub>b</sub>	S <sub>c1</sub>	S <sub>c2</sub>	
Starting material	CZ 100mm silicon wafer	CZ 100mm silicon wafer			
First step	Implantation	O <sup>+</sup> , 160keV, 5.5×10 <sup>17</sup> cm <sup>-2</sup> ; N <sup>+</sup> , 90keV, 2.6×10 <sup>17</sup> cm <sup>-2</sup> ; O <sup>+</sup> , 70keV, 2.5×10 <sup>17</sup> cm <sup>-2</sup>	N <sup>+</sup> , 150keV, 9.0×10 <sup>17</sup> cm <sup>-2</sup>	Simgui 150mm SIMOX wafer with oxygen implantation of 190keV, 6.1×10 <sup>17</sup> cm <sup>-2</sup>	Simgui 150mm SIMOX wafer with oxygen implantation of 70keV, 2.5×10 <sup>17</sup> cm <sup>-2</sup>
	Annealing	1200°C, 120min, O <sub>2</sub> + Ar	1200°C, 120min, N <sub>2</sub>		
Second step	Implantation	—	O <sup>+</sup> , 130keV, 3.5×10 <sup>17</sup> cm <sup>-2</sup>	N <sup>+</sup> , 160keV, 9.0×10 <sup>17</sup> cm <sup>-2</sup>	
	Annealing	—	1250°C, 300min, O <sub>2</sub> + Ar	1200°C, 120min, N <sub>2</sub>	

### 3 结果

图1分别给出了四个样品的XTEM测试结果。从图中可以看出样品均具有类SOI结构:顶层硅/绝缘埋层/衬底硅。但由于制备方法和条件的不同,样品的顶层硅质量、埋层内部结构以及埋层上下界面均有明显差异。

由图1可计算出,S<sub>a</sub>的顶层硅约为100nm,埋层

又可分为三层,其中居上的A层厚约150nm,居中的B层厚约120nm,居下的C层厚约100nm。埋层同顶层硅之间的界面比较清晰,但有微小扭曲。对A区做微区电子能谱测量,发现A区的基体为含有少量氮的不饱和硅氧化物(含氧量为28%~46%),其中颗粒状物为硅岛,未发现氮化硅结晶。经选区电子衍射测量确定B层为受损单晶硅,C层为非晶的硅氧化物,主要由注入中160keV的高能氧离子形成。

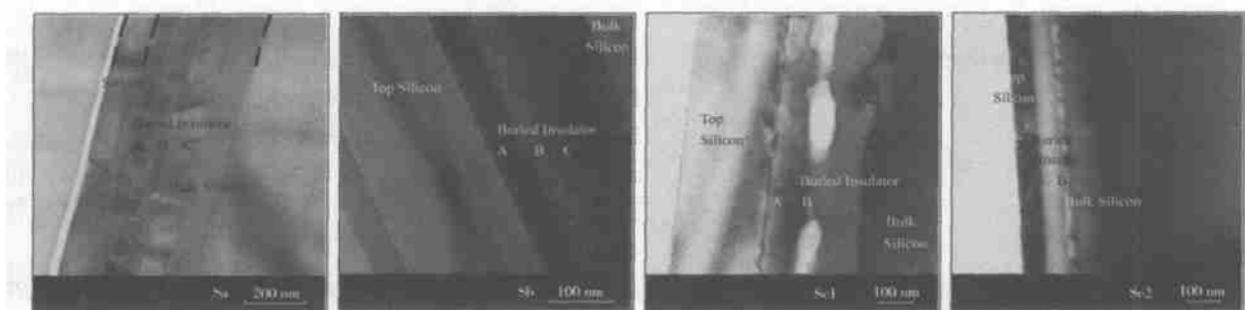


图1 各样品的透射电镜图样

Fig. 1 XTEM pictures of the samples

S<sub>b</sub>顶层硅约为190nm,埋层同样可以分为A,B,C三层,厚度分别为50,100和80nm。埋层同顶层硅之间的界面清晰平直。埋层与衬底硅之间的界面比上界面稍差。将XTEM图与图2中S<sub>b</sub>的SIMS原子浓度深度分布对应分析,可知A和C这两层分别对应着富SiO<sub>x</sub>层和富SiN<sub>x</sub>层,而B层则为A层、C层的混合过渡区域。随A,B,C的顺序,含氧量逐渐减少,而含氮量相应增多,各层缺陷较少。

S<sub>c1</sub>顶层硅约为270nm。埋层可分为A,B两层,分别对应氮化埋层和氧化埋层。恰当的能量搭配使得氮离子刚好注入在埋氧层的上方,并与之紧密相连。氮化埋层与顶层硅之间的上界面不是非常平整,氮化层与氧化层之间的过渡区域不规则(白色空洞非材料原来所有,是过渡区域在为透射电镜制样时脱落而成)。本来均匀陡峭的氧化埋层与衬底硅之间的界面有相当大的变化,出现了波浪状的起伏。

$S_{c2}$  顶层硅约为 75nm, 埋层和顶层硅的厚度均匀, 未发现硅岛, 说明硅岛密度小于 XTEM 的检测极限  $10^5/cm^2$ . 顶层硅与埋层之间的界面陡峭、清晰、平直. 同样品  $S_b$  一样,  $S_{c2}$  埋层和衬底硅之间的界面比上界面差. 埋层可分为 A, B 两层, 层间平直过渡线清晰可见. 与图 2 中  $S_{c2}$  的 SIMS 深度分布比较, 可以确定 A, B 层分别对应  $\text{SiO}_x$  和  $\text{SiN}_x$ . 恰当的注入能量选择使得氮化埋层刚好能与氧化埋层紧密连接.

图 2 为样品  $S_b$  和  $S_{c2}$  的 SIMS 原子浓度深度分布图, 氮氧双峰彼此靠近, 氧原子在氮峰的上下界面均有富集.  $S_{c2}$  的顶层硅厚约 73nm, 氧化埋层厚约 68nm, 氮化埋层厚约 105nm, 这和透射电镜结果是一致的.

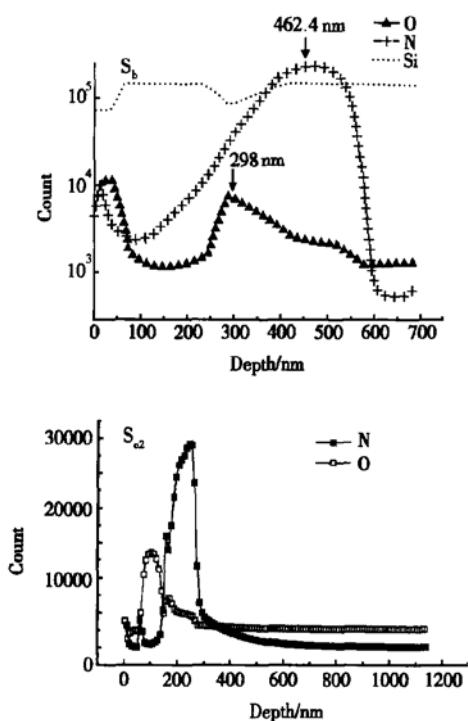


图 2 样品  $S_b$  和  $S_{c2}$  的 SIMS 原子浓度深度分布图

Fig. 2 SIMS depth profiles of the samples of  $S_b$  and  $S_{c2}$ , respectively

图 3 为样品  $S_b$  和  $S_{c2}$  的扩展电阻图. 由图可见样品的电阻率分布与 XTEM 和 SIMS 结果都吻合得较好, 在埋层区域电阻率分别达到  $5 \times 10^8 \Omega$  和  $2.1 \times 10^7 \Omega$ , 其中样品  $S_{c2}$  埋层区域电阻率比样品  $S_b$  小, 与氧、氮离子注入剂量对应, 而顶层硅区域由于太薄, 扩展电阻谱图显示出电阻率有缓慢上升的趋势.

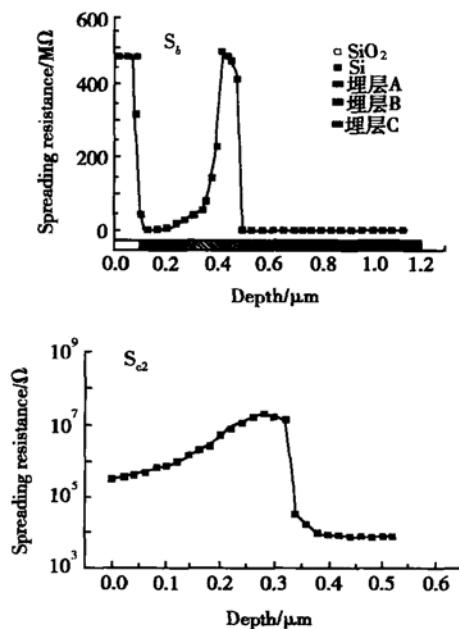


图 3 样品  $S_b$  和  $S_{c2}$  的扩展电阻谱图

Fig. 3 SRP pictures of the samples of  $S_b$  and  $S_{c2}$ , respectively

#### 4 分析和讨论

样品  $S_a$  的埋层 A 中存在硅岛, 这将大大降低埋层绝缘性能, 导致击穿电场阈值的降低. 双离子注入后一次退火中两种离子的互相影响要比分布退火大, 形成机制比较复杂, 很难得到良好的埋层结构和高质量的上界面. 因此在抗辐射器件制备实用材料时我们均采用分步注入分步退火的方法.

当系统内含有两个或两个以上的相, 且它们处于热力学平衡时, 不同相之间的界面称为相界 (phase boundary, PB; 或称为 interface boundary). 两相结构不同或晶格常数差别很大 ( $> 10\%$ ) 时, 两相交界区称为非共格相界. 这里原子排列基本上是无序的, 是两相的畸变. 由于 N 在  $\text{Si}_3\text{N}_4$  中的扩散系数比 O 在  $\text{SiO}_2$  中低得多, 注入剂量大于化学配比时则会出现与硅未键合的 N 存在, 从而造成多晶 a- $\text{Si}_3\text{N}_4$  的形成. 由于界面态对氮原子的吸附, 这种多晶结构也经常在界面处出现. 多晶氮化硅和单晶硅之间出现晶格失配产生两相畸变, 在宏观的表现上就是氮化硅层与单晶硅之间的界面质量不好, 如  $S_{c1}$  埋层和顶层硅之间的界面,  $S_b$  和  $S_{c2}$  埋层和衬底硅之间的界面. 不够平整的上界面会导致埋层绝缘性能的下降, 是我们所不希望的, 因此,  $S_b$  所代表的制

备方法一般不用来制作实用器件。

样品S<sub>b</sub>和S<sub>c2</sub>均具有很好的埋层结构和上界面,中国科学院半导体所采用全离子注入低温辐射加固工艺在这两种方法制备的材料基础上均成功制作出了单管MOS器件。比较S<sub>b</sub>和S<sub>c2</sub>的透射电镜图,S<sub>b</sub>的氧化层和氮化层之间有较宽区域的过渡,这和注入条件有一定关系,另外S<sub>b</sub>的退火温度高于S<sub>c2</sub>也是其中一个重要原因。扩散系数与温度之间的关系可由公式 $D = D_0 \exp(-E/kT)$ 表示<sup>[6]</sup>,其中 $D_0$ 为频率因子,与扩散温度无关, $E$ 为激活能, $T$ 为温度, $k$ 为玻耳兹曼常数。S<sub>b</sub>由于退火温度高,氮氧离子的扩散系数变大,增强了互相扩散。而S<sub>c2</sub>的对应部分转化为平直过渡线。图4给出两个样品在下界面附近的高分辨透射电镜图。两个样品的衬底硅均为结晶状态良好的单晶结构,但氮化层形貌有很大区别。S<sub>b</sub>的氮化层中有许多取向不同的晶粒,它们的面间距为0.43nm,是Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>多晶相。而S<sub>c2</sub>的氮化层中没有发现明显晶粒存在,基本为非晶结构。我们认为是氮注入剂量的不同造成了这个差异。S<sub>b</sub>的氮注入剂量为 $9.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ ,S<sub>c2</sub>的剂量为 $6.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ ,后者达不到化学剂量比,从而无法形成多晶Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>。



图4 S<sub>c2</sub>和S<sub>b</sub>下界面附近的高分辨透射电镜图

Fig. 4 HRTEM micro-graphs of the lower interfaces of S<sub>c2</sub> and S<sub>b</sub>

我们制备SIMON材料的出发点是改善SOI材料的抗总剂量辐照性能,因此抗总剂量辐照的能力是考察材料优劣的重要指标。在和中国科学院半导体所合作的实验中,用S<sub>b</sub>代表的方法制作的PMOSFET在总剂量辐照剂量为 $3 \times 10^5 \text{ rad(Si)}$ ,用S<sub>c2</sub>代表的方法制作的PMOSFET剂量为 $5 \times 10^5 \text{ rad(Si)}$ 时,电学特性参数均未产生较大漂移。另外,考虑到

SIMOX材料已经可以比较成熟地进行商业化生产,而S<sub>c2</sub>代表的方法即是首先形成SIMOX材料,这一方面给我们实验带来了方便,另一方面,为SIMON材料实际生产的兼容性提供了条件。综合以上分析,S<sub>c2</sub>代表的方法在抗总剂量辐照能力、制备简易度以及潜在的生产兼容性方面均好于其他方法,是我们目前制备SIMON材料的首选方法。

## 5 结论

采用不同的氮氧离子共注入方法分别成功制备了具有多埋层类SOI结构的新型SIMON材料。用XTEM,HRTEM和SIMS对材料进行了结构测试及分析。发现SIMON材料的结构对注入条件和退火工艺非常敏感。适当选择制备方法和工艺,得到了高质量的SIMON材料。实验结果发现氮、氧均有在界面处富集的趋势。对各种氮氧复合注入技术作了初步分析和比较。SIMON材料除了拥有传统SOI材料的基本优点之外,还弥补了传统SOI材料在总剂量效应和自加热效应方面的不足,具有非常广阔的发展前景。

**致谢** 感谢中国科学院半导体研究所张国强博士和李宁在材料抗总剂量辐照实验中的合作。感谢复旦大学曹永民老师、陈一老师在SIMS,HRTEM测试中的帮助。感谢中国科学院上海微系统与信息技术研究所王葛亚老师在XTEM测试中的帮助。感谢中科院上海硅酸盐研究所冯景伟老师在HRTEM测试中的帮助。

## 参考文献

- [1] Lee S C, Raparla A, Li Y F, et al. Total dose effects in composite nitride-oxide films. IEEE Trans Nucl Sci, 2000, 47 (6): 2297
- [2] Liu Zhongli, Li Ning, Liu Xianghua, et al. Total dose irradiation characteristic of SOI materials fabricated by co-implantation of nitrogen and oxygen. The Fifth National Symposium on SOI Technology, 2002: 116(in Chinese) [刘忠立, 李宁, 刘相华, 等. 氮氧注入SOI结构的抗总剂量电离辐射特性. 第五届全国SOI技术研讨会, 2002: 116]
- [3] Yi Wanbing, Liu Xianghua, Liu Zhongli, et al. Fabrication of SOIM material by co-implantation of nitrogen and oxygen and investigation of its total dose radiation hardness. The Fifth National Symposium on SOI Technology, 2002: 128(in Chi-

- nese) [ 易万兵, 刘相华, 刘忠立, 等. 氮氧复合注入形成SOIM 材料及其抗总剂量辐照的研究. 第五届全国SOI 技术研讨会, 2002: 128]
- [ 4 ] Roig J, Flores D, Vellvehi M, et al. Reduction of self-heating effect on SOIM devices. *Microelectron Reliab*, 2002, 42: 61
- [ 5 ] Xie Xinyun, Liu Weili, Men Chuanling, et al. Fabrication of silicon-on-insulator structure with Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> as buried insulating films by epitaxial layer transfer. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24( 2): 189 (in Chinese) [ 谢欣云, 刘卫丽, 门传玲, 等. 多孔硅外延转移技术制备以氮化硅为绝缘埋层的SOI 新结构. *半导体学报*, 2003, 24( 2): 189]
- [ 6 ] Li Xing. *The foundary for VLSI technology*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1999: 55 (in Chinese) [ 李兴. 超大规模集成电路技术基础. 北京: 电子工业出版社, 1999: 55]

## Comparison of Fabrication Techniques of SIMON Materials with Buried Multi-Layers\*

Yi Wanbing<sup>1</sup>, Chen Meng<sup>1,2</sup>, Zhang Enxia<sup>1</sup>, Liu Xianghua<sup>3</sup>, Chen Jing<sup>1</sup>, Dong Yemin<sup>1</sup>, Jin Bo<sup>1</sup>, Liu Zhongli<sup>4</sup> and Wang Xi<sup>1,2</sup>

(1 Ion Beam Laboratory, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology,  
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

(2 Shanghai Simgui Technology Corporation Limited, Shanghai 201821, China)

(3 Department of Electronic Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China)

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

**Abstract:** SIMON SOI materials are successfully fabricated by sequential implantation and annealing of oxygen and nitrogen ions with quite a few combinatorial dose-energy-sequence conditions. The results indicate that superior SIMON SOI wafers with highly sharp interface structure can be fabricated by choosing dose-energy implantation conditions and implantation sequence carefully. Different fabrication methods are compared.

**Key words:** SIMON; SOI; co-implantation of nitrogen and oxygen

**PACC:** 8100

**Article ID:** 0253-4177(2004)07-0814-05

\* Project supported by National Natural Science Foundation of China(No. 59925205)

Received 6 July 2003, revised manuscript received 15 October 2003

© 2004 The Chinese Institute of Electronics