

注氮工艺对 SOI 材料抗辐照性能的影响*

张恩霞¹ 钱 聪¹ 张正选¹ 王 曦¹ 张国强² 李 宁² 郑中山² 刘忠立²

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

(2 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 分别采用一步和分步注入的工艺制备了氧氮共注形成 SOI(SIMON)材料,并对退火后的材料进行了二次离子质谱(SIMS)分析,结果发现退火之后氮原子大多数聚集在 SiO₂/Si 界面处.为了分析材料的抗辐照加固效果,分别在不同方法制作的 SIMON 材料上制作了 nMOS 场效应晶体管,并测试了晶体管辐射前后的转移特性.实验结果表明,注氮工艺对 SOI 材料的抗辐照性能有显著的影响.

关键词: 氧氮共注; SIMON; SOI; 离子注入

PACC: 6170T; 8140R; 7340R

中图分类号: TN386 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)06-1369-04

1 引言

SOI(silicon on insulator)技术具有诸多优点,如高运转速度、低功耗、全隔离、优越的抗剂量率辐射以及优良的抗单粒子效应等,使得 SOI 技术在各个研究领域受到青睐.然而 SOI 材料在抗总剂量方面,与体硅相比并没有优势,因此如何提高 SOI 器件的抗总剂量性能成为目前研究的焦点. Lee 等人在热氧化 SiO₂ 上沉积氮化硅薄膜^[1],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.受此启发我们曾采用氮氧离子共注入的方法制备多埋层 SIMON(separation by implantation of oxygen and nitrogen)材料^[2],并与中国科学院半导体研究所合作进行抗辐照实验,发现与传统 SIMOX(separation by implantation of oxygen)相比,这种具有氮氧复合埋层结构的新型 SOI 材料对总剂量效应的承受能力有大幅提高^[3,4].另外很重要的一点,氮氧多埋层 SOI 材料也可以降低传统 SOI 器件固有的自加热效应^[5].本

文主要是采用不同的工艺在 SIMOX 材料中注入了 N 离子,并在 SIMOX 和 SIMON 材料上均制作了 nMOS 场效应晶体管,并研究了注氮工艺对器件抗总剂量辐射性能的影响.

2 实验

实验所用的初始材料是 p 型 100 Ω ·cm, 100mm, CZ 硅圆片,电阻率为 10~20 Ω ·cm.在此基础上,分别采用一步退火、两步退火的工艺制备了 SIMON 圆片,具体工艺参数如表 1 所示.其中样品 G 是 SIMOX 对比样品.为了研究材料的结构特征,采用二次离子质谱分析(SIMS)的方法研究了 N, O 元素在材料中的浓度分布.

在以上 SIMOX 和 SIMON 圆片衬底上制作了沟道长度为 1.2 μ m 的 nMOSFET,栅氧温度为 900 $^{\circ}$ C,气氛为 H₂ + O₂ 合成氧化,厚度为 25nm.利用 Co-60 源对器件进行了辐照试验,辐照的剂量率是 300rad(Si)/s,总剂量是从 0 到 5 $\times 10^5$ rad(Si).

* 国家杰出青年基金(批准号:59925205),上海市基础研究基金(批准号:02DJ14069)和国家自然科学基金(批准号:10305018)资助项目

张恩霞 女,1977 年出生,博士研究生,主要从事 SOI 材料及器件抗辐射加固方面的研究.

钱 聪 男,1979 年出生,博士研究生,主要从事 SOI 材料及器件辐射可靠性研究.

张正选 男,1966 年出生,研究员,主要从事 SOI 材料、器件及电路抗辐射加固研究.

2004-08-25 收到,2005-01-10 定稿

表 1 各样品的具体制备条件

Table 1 Fabrication conditions of the samples

Sample	Implantation of oxygen	Annealing	Implantation of nitrogen	Annealing	
A	190keV, $6.1 \times 10^{17} \text{cm}^{-2}$	1300 , 300min , Ar + 3vol % O ₂	160keV, $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$, 300	1200 , 120min, N ₂	
B			160keV, $8 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$, 300		
C			160keV, $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$, 300		
D			160keV, $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-2}$, 300		
E			160keV, $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-2}$, 300		1300 , 300min , Ar + 3vol % O ₂
F			160keV, $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-2}$, 300		
G	—	—			

3 结果与分析

3.1 SIMS 分析

采用二次离子质谱 (SIMS) 方法分析了两步退火工艺注 N⁺ 形成的 SIMON 材料中 O, N 浓度分布, 结果如图 1 所示. 可以看出, 退火后 N⁺ 在上下界面处形成峰值, 这说明, 退火之后氮原子大多数聚集在顶层 Si/SiO₂ 和 SiO₂/衬底 Si 界面处, 同时埋层中也存在一定量的氮原子. 由图还可以看出, N 在 SIMOX 埋层中与 Si 形成了 Si—N 键, 这可以说明 N 对 SIMOX 材料和器件抗辐射性能改善应该归结为 N 替换部分弱键和应力键的作用^[6].

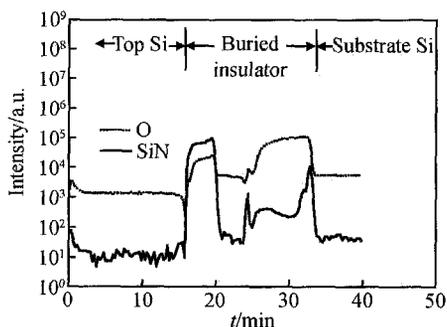


图 1 SIMS 分析结果

Fig. 1 Results of SIMS

3.2 SIMON 材料抗辐射性能分析

各样品的 nMOSFET 晶体管辐射前后的 I_{ds} - V_{gs} 特性如图 2 所示. 可以看出, 辐照前一步退火样品 E、F 的漏电都远大于二步退火样品, 且与注 N 剂量有关; 辐照后各样品 nMOS 晶体管的漏电流增幅都比较大, 但是二步退火样品辐照后漏电流明显低于一步退火样品, 并低于 SIMOX 样品的漏电流. 这说明一步退火工艺不利于 SIMON 器件的电学性能, 更不利于器件的抗辐射加固, 这主要是因为一步

退火工艺不能很好地消除高剂量氧注入和氮注入所引入到 SOI 材料顶层硅和绝缘层的注入损伤.

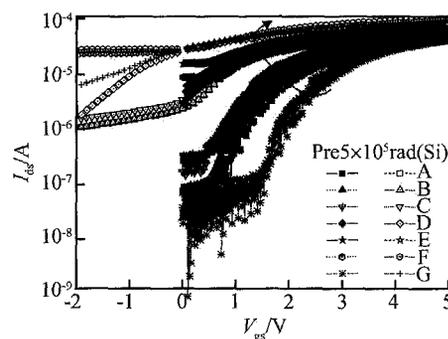


图 2 各样品 nMOSFET 辐照前后的转移特性

Fig. 2 I_d - V_{gs} curves of nMOSFET fabricated on each samples before and after radiation

图 3 给出了不同辐照剂量条件下注氮剂量与阈值电压漂移量的关系. 可以看出, 辐射剂量越低阈值电压漂移量越小; 对于不同注 N 剂量的样品在相同的辐照剂量条件下, 阈值电压漂移量也不同. 在此注氧工艺条件下, 对于两步退火工艺的样品, 最佳注 N 剂量是 $8 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$; 对于一步退火工艺的样品, N 的最佳注入剂量是 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-2}$. 比较图 3(a) 和 (b) 可以知道, 在相同辐照剂量下, 两步退火工艺的样品阈值电压漂移量低于一步退火工艺的样品, 而且都低于 SIMOX 样品. 结合图 2 则可以很好地证明, 在 SIMOX 中注入一定剂量的氮能够改善 SOI 材料的抗辐射性能.

SOI 器件的总剂量效应中, 三种 Si/SiO₂ 界面, 即硅/ (栅氧、埋氧和边缘场氧) 中的界面态, 以及埋氧都会俘获辐射产生的空穴. 目前的实验表明, SiO₂ 埋氧/衬底硅之间的下界面由于其界面陷阱密度较 SiO₂ 埋氧/顶层硅的上界面陷阱密度大, 所以从理论上说下界面俘获空穴多一些. 但是, 空穴俘获过程还与空穴俘获截面大小、界面势垒高度、空穴在界面处的能量等有关, 所以是一个复杂的过程. SiO₂ 中

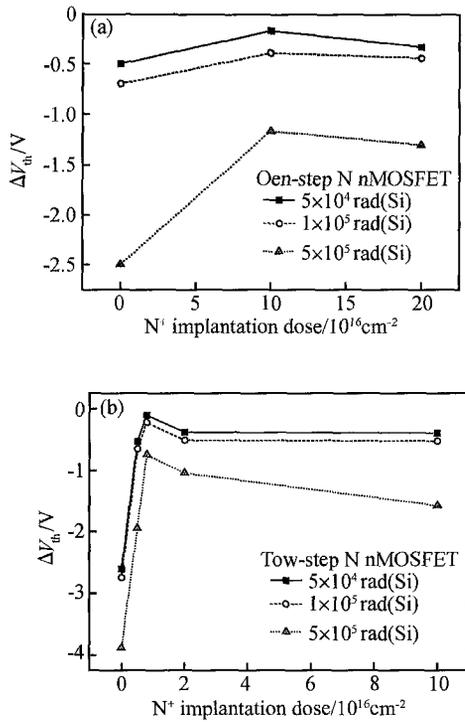


图 3 不同辐照剂量条件下阈值电压漂移与注 N 剂量的关系 (a) 一步退火; (b) 两步退火

Fig. 3 Shift of the threshold voltage changes with different doses of N implanted under various total radiation doses (a) One-step annealing; (b) Two-step annealing

俘获空穴主要是其中的空穴陷阱(如氧空位、E 电子中心等缺陷),而 SiO_2/Si 界面俘获空穴主要是界面缺陷(如 Pb 中心)。它们对器件电特性的影响是有差别的,主要表现在 E 电子中心俘获辐射产生的空穴后,将导致正电荷的产生,从而引起 nMOSFET 和 pMOSFET 阈电压的负向漂移。Pb 中心俘获辐射产生的空穴后,由于 Pb 中心的两重性,可能导致界面处的正电荷(SiO_2/n 型硅)或负电荷(SiO_2/p 型硅)的积累,其结果将引起 pMOSFET 负向阈漂或 nMOSFET 的正向阈漂。因此,对 pMOSFET 而言,无论是 SiO_2 俘获的空穴还是界面所俘获的空穴,都将引起阈电压 V_T 的负向漂移, V_T 的总漂移(由二者之和决定)决定于俘获空穴多的一方。但对 nMOSFET 而言,由于界面态对 V_T 的贡献是使其正向漂移,所以器件 V_T 的总漂移方向取决于二者互补的结果。如果 SiO_2 中俘获的空穴较多,总 V_T 将负向漂移,如果俘获的空穴较少,总 V_T 将正向漂移。 SiO_2 和界面中的陷阱俘获空穴越多,将越使 SOI 器件的抗辐射水平下降。

对典型的 SIMOX 器件辐照时,由于埋层内存在高浓度的空穴陷阱,整个氧化埋层内辐照所产生的电子-空穴对中的空穴几乎在原位被俘获,而电子则被浅能级电子陷阱俘获并很快就被热激发,随后大多数热激发的电子被电场扫出氧化埋层。这样,埋层宏观上带正电,从而影响器件的正常使用性能。根据以往的研究,N 离子注入 SIMOX 的隐埋氧化层后能产生大量电子陷阱^[7]。并且退火后,N 离子与 Si 结合形成键能较大的 Si—N 键,替代了部分弱键^[6]。一方面,弱键被替代能够减低在电离辐射中产生的电子-空穴对,从而提高器件的抗辐射性能;另一方面,在电离辐射中,这些电子陷阱俘获电子后既可以作为复合中心吸引辐射产生的空穴,又可以补偿被空穴陷阱俘获的空穴,有助达到宏观电中性。它们还影响了埋层内电场,有利于辐照后产生的电子-空穴对的复合^[8]。因此,N 离子的注入能提高 SOI 器件的抗辐照性能。另外,电离辐射在 SiN_x 层中也会产生电子-空穴对,但基本上都被原位俘获^[9],这样 SiN_x 层保持宏观电中性,有利于器件抗辐射。但是,高剂量氮离子的注入对氧化埋层的结构产生影响,致密的 SiO_2 原子网络会松弛,Si—O—Si 键角变得更大。根据 Mrstik 的模型^[9,10],这会使得更多的空穴俘获在氧化埋层内部,不利于器件的抗辐照性能。较低剂量氮离子的注入可以弥补埋层 SiO_2 中的缺氧键,有利于提高材料的抗辐照性能。但如果采用一步退火工艺法注 N 加固 SOI 材料,所获得的 SIMOX 材料中含有大量的缺陷,埋层的质量较差,不利于器件的漏电性能,更不能用于抗辐照加固的器件。

由以上分析可知,较低剂量 N 离子的注入结合二步退火工艺是加固 SOI 材料的一种有效途径。

4 结论

以上的研究分析结果表明,采用适当的离子注入方式、适当的退火工艺将 N 离子引入 SIMOX 埋氧层,能够改善 nMOSFET/SOI 的漏电性能,减小辐照前后 nMOSFET/SOI 的阈值电压漂移。适当剂量的 N 离子注入有利于加固 SIMOX 器件的抗辐照性能,在相应的实验条件下,对于两步退火工艺而言,注氮的最佳剂量是 $8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$;对于一步退火工艺, $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ 则是最佳注入剂量。总之,适当剂量的 N 离子注入,结合二步退火工艺是加固 SIMOX 材料的一种有效途径,有较好的应用前景。

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] Yi Wanbing, Chen Meng, Zhang Enxia, et al. Comparison of the fabrication techniques of SIMON materials with buried multi-layers. *Chinese Journal of Semiconductors* 2004, 25(7) : 815 (in Chinese) [易万兵, 陈猛, 张恩霞, 等. 具有复合埋层的新材料 SIMON 材料的制备. *半导体学报*, 2004, 25(7) : 815]
- [3] 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]
- [4] 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 Chinese) [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]
- [5] Roig J, Flores D, Vellvehi M, et al. Reduction of self-heating effect on SOIM devices. *Microelectronics Reliability*, 2002, 42 : 61
- [6] Zhang Guoqiang, Lu Wu, Yu Xuefeng, et al. Characteristics of ionizing radiation and annealing in nitride thin oxide. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, 20(5) : 437 (in Chinese) [张国强, 陆妩, 余学锋, 等. 含 N 薄栅介质的电离辐照及退火特性. *半导体学报*, 1999, 20(5) : 437]
- [7] Yi W B, Zhang E X, Liu X H, et al. Formation of total-dose-radiation harden materials by sequential oxygen and nitrogen implantation and multi-step annealing. *Semiconductor Science and Technology*, 2004, 19 : 571
- [8] Nejm A, Marsh C D, Giles L F, et al. An investigation of the role of the time averaged ion beam current density upon the defect densities in thin film SIMOX. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 1994, 84(2) : 248
- [9] Mrstik B J, Hughes H L, McMarr P J, et al. Hole and electron trapping in ion implanted thermal oxides and SIMOX. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2000, 47 : 2189
- [10] Mrstik B J, Afanas 'ev V V, Stesmans A, et al. Relationship between oxide density and charge trapping in SiO₂ films. *J Appl Phys*, 1999, 85 : 6577

Effect of Nitrogen Implantation Technologies on Total Dose Rad-Hardness of SIMON Materials *

Zhang Enxia¹, Qian Cong¹, Zhang Zhengxuan¹, Wang Xi¹, Zhang Guoqiang²,
Li Ning², Zheng Zhongshan², and Liu Zhongli²

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

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

Abstract : Separation by implantation of oxygen and nitrogen (SIMON) materials are fabricated by one-step and two-step annealing, respectively. The distribution of the ions in the wafers is analyzed by secondary ions mass spectrometer (SIMS), and the results show that many nitrogen ions are collected at the interfaces of SiO₂/Si after annealing. In order to investigate the rad-hardness of the materials, nMOSFETs are fabricated on the SIMOX and SIMON wafers, respectively. The *I-V* characteristics of the transistors are measured before and after the total dose irradiation. The experiment results show that the total dose rad-hardness of the SIMOX materials can be improved by nitrogen ion implantation and the implantation technology plays an important role.

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

PACC : 6170T; 8140R; 7340R

Article ID : 0253-4177(2005)06-1269-04

* Project supported by the National Fund for Distinguished Young Scholars (No. 59925205), the Basic Research Program of Shanghai (No. 02DJ14069), and the National Natural Science Foundation of China (No. 10305018)

Zhang Enxia female, was born in 1977, PhD candidate. Her research interest is in rad-hardness for SOI materials and devices.

Qian Cong male, was born in 1979, PhD candidate. His research interest is in rad-hardness for SOI materials and devices.

Zhang Zhengxuan male, was born in 1966, professor. His research interest is in SOI devices and integrated circuits.

Received 25 August 2004, revised manuscript received 10 January 2005

©2005 Chinese Institute of Electronics