

注氮工艺对 SIMOX 器件电特性的影响

张国强¹ 刘忠立¹ 李 宁¹ 范 楷¹ 郑中山¹ 张恩霞² 易万兵² 陈 猛² 王 曦²

(1 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(2 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘要: 研究了氮离子注入对 SIMOX 器件电特性的影响. 氮注入 SIMOX 的埋氧层并退火后, 将减小前栅 MOSFET/SIMOX 的阈值电压, 提高其漏源击穿电压但对栅击穿电压影响较小. 氮注入方式对 SIMOX 器件的 $I-V$ 特性有重要影响.

关键词: SIMOX; MOSFET; 氮

EEACC: 2570D; 2560R

中图分类号: TN305

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)04-0835-05

1 引言

SOI(silicon on insulator)技术是在绝缘二氧化硅衬底上的薄层硅中制作硅器件的工艺技术. 基于 SOI 结构的器件在本质上可以减小结电容和漏电流, 提高开关速度, 降低功耗, 实现高速、低功耗运行. 因此, 已经成为微电子领域非常受重视的研究方向, 并被广泛应用于低压、低功耗、高速度、抗辐射和抗高温的特殊环境.

注氧隔离技术即 SIMOX(separation by implanted oxygen)是目前制备 SOI 衬底的主流技术之一. 它是通过向单晶硅圆片中注入大剂量的氧, 从而形成绝缘的二氧化硅埋层, 最后在顶硅膜的硅岛上制作器件电路的 SOI 技术. 其优点是工艺简单、成本较低、适合于超薄短沟 SOI 器件的制作; 缺点是它的埋氧层质量难于控制, 尤其因为埋氧而产生的前界面与背界面、前沟与背沟的耦合, 以及背沟漏电流等对器件特性会产生负面影响. 另外, SOI 器件固有的 Kink 效应、寄生双极晶体管效应、自加热效应等, 亦是 SIMOX 技术应用受到制约的主要因素. 特别是当 SIMOX 器件应用到辐射环境下, 由于栅氧层和栅氧/硅界面、埋氧层和埋氧/硅界面中存在大量缺陷(如氧空位、电子陷阱、三价硅中心、无定型硅中心、E 中心和界面态等), 这些缺陷在俘获辐射所产生的空穴或电子后, 将导致器件电参数退化, 甚

至功能失效, 严重影响了 SIMOX 器件在辐射环境中使用的可靠性. 因此, 研究并制备具有较少埋氧层和界面缺陷的 SIMOX 衬底材料, 是提高 SOI 器件性能的关键所在.

最近十几年, 国内外已经大量报道了关于改善 SIMOX 材料质量和提高器件性能的研究内容^[1-7], 主要集中在以下几方面: 埋氧层制备工艺技术、器件工艺和结构、埋氧介质中的缺陷和电荷等. 通过这些研究获得了关于 SIMOX 材料和器件特性的许多重要结果. 同时, 也有研究表明, 采用 $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ 三明治结构作为 ZMR 的埋氧层^[8], $\text{N}^+ + \text{O}^+$ 联合注入 Si 中形成 SIMOX 的埋氧层^[9,10], 或用氨气退火以及用 CVD 技术淀积 Si_3N_4 形成 BESOI 绝缘埋层等^[11], 对 SOI 器件的电离辐射特性均有较好的改善作用.

本文研究了氮离子注入对 SIMOX 器件电特性的影响规律, 发现氮对前栅 n 沟和 p 沟 MOSFET/SIMOX 器件的 $I-V$ 特性和击穿特性将产生重要影响, 而这些特性的改变对 SIMOX 衬底材料和器件的制备及应用具有一定的指导作用.

2 实验

实验所用 SIMOX 对比样品制作在电阻率为 $20 \Omega \cdot \text{cm}$ p 型 Si, (100) 晶向的标准氧注入的 SIMOX 衬底上, 顶硅膜厚度为 195 ~ 201nm, 埋氧层

厚度为 370 ~ 385nm. 注氮样品的制备为:在标准 SIMOX 圆片上($180\text{keV}, 1.8 \times 10^{18} \text{cm}^{-2}$ 氧注入)通过顶层硅向 SIMOX 圆片的埋氧层注入一定能量和不同剂量的氮离子,然后进行注入后的退火.退火的目的是为了减小注入对顶硅膜(有源区)和埋氧层的损伤.为了优化退火条件,本文试验了两种退火方式:一次退火与二次退火.一次退火法就是标准氧注入后不退火,然后注入氮离子,再进行退火;二次退火法就是标准氧注入后先退火,然后注入氮离子,再进行退火.所有注入及退火的基本条件如表 1 所示. SIMOX 器件的制备为:在不同的 SIMOX 衬底上分别制作沟道长度为 $1.2\mu\text{m}$,宽度为 $3.6\mu\text{m}$ 的多晶硅栅 n 沟和 p 沟 MOSFET,多晶硅厚 450nm ,栅氧化为 $900 \text{H}_2 + \text{O}_2$ 合成氧化,栅氧厚度为 25nm . 沟道掺杂为: $100\text{keV}, 8 \times 10^{10} \text{cm}^{-2} \text{P}^+$ 注入 (pMOSFET); $100\text{keV}, 1.5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2} \text{BF}_2^+$ 注入 (nMOSFET). 采用 LDD 结构用于热载流子损伤的抑制, p^+ 体接触用于减小浮体效应.

表 1 SIMOX 衬底中不同的 N 引入方式

Table 1 Different implanting processes of nitrogen in SIMOX substrates

N 引入方式	O 注入		N 注入			
	退火温度 /	退火气氛	能量 / keV	剂量 / cm^{-2}	退火气氛	退火时间 / min
二次退火法	1300	$\text{O}_2 + \text{Ar}_2$	160	5×10^{15}	N_2	240
				8×10^{15}		
				2×10^{16}		
				1×10^{17}		
一次退火法	未退火	未退火	160	1×10^{17} 2×10^{17}	$\text{O}_2 + \text{Ar}_2$	300

对 SIMOX 衬底圆片进行了 N 浓度分布的二次离子质谱 (SIMS) 分析,试验条件为:一次离子: O^+ , 能量 15keV ,束流 92nA ,扫描面积 $250\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$; 二次离子: 负离子,能量 4.5keV ,分析区直径 $60\mu\text{m}$,真空度小于 $1.3 \times 10^{-6} \text{Pa}$.

由 Keithley 4200 等仪器组成的测试系统完成了 n 沟和 p 沟 MOSFET/SIMOX 前栅器件 $I_{\text{ds}}-V_{\text{gs}}$ 、 $I_{\text{ds}}-V_{\text{ds}}$ 和漏源击穿电压 BV_{DSS} 的测试. $I_{\text{ds}}-V_{\text{gs}}$ 测量时取 $V_{\text{ds}} = \pm 0.1\text{V}$ (pMOSFET 取 -0.1V , nMOSFET 取 $+0.1\text{V}$). BV_{DSS} 的测试是通过测量 nMOSFET 和 pMOSFET 的 $I_{\text{ds}}-V_{\text{ds}}$ 曲线 (取 $V_{\text{gs}} = 0\text{V}$), V_{ds} 扫描直到 $I_{\text{ds}} = 10^{-3} \text{A}$ 时对应的 V_{ds} 就是击穿电压 BV_{DSS} . 栅击穿电压是通过测量 $I_{\text{g}}-V_{\text{g}}$ 曲线 (取 $V_{\text{ds}} = 0\text{V}$), V_{g} 扫描直到 $I_{\text{g}} = 10^{-3} \text{A}$ 时对应的 V_{g} 就是栅介质的击

穿电压.

3 结果及分析

3.1 氮在 SIMOX 中的深度分布

图 1 所示为二次退火法注 N (注 N 能量为 160keV ,剂量为 $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$) 后,用 SIMS 法获得的 O 和 SiN 在 SIMOX 衬底上的纵向浓度分析结果.由图可见, N^+ 注入 SIMOX 埋层并进行适当的注入退火后,部分 N 离子被引入到 SIMOX 的埋氧中,并在顶 Si/埋 SiO_2 和埋 SiO_2 /衬底 Si 的两界面处形成峰值. N 对 SIMOX 器件特性的影响应该归结为 N 在埋氧层和 Si/SiO₂ 界面的行为.

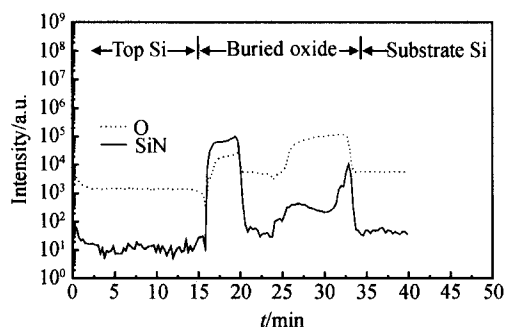


图 1 用 SIMS 法获得的 N 的纵向分布

Fig. 1 SIMS profile of N distribution

3.2 氮对 SIMOX 器件初始 I-V 特性的影响

图 2 和图 3 所示的是二次退火氮引入方式所制作的前栅 nMOSFET 和 pMOSFET 的 $I_{\text{ds}}-V_{\text{gs}}$ 特性.由此可见:(1) 氮引入到 SIMOX 埋氧后,将减小 nMOSFET 和 pMOSFET 的阈值电压值;(2) 氮注入剂量越高,阈值电压减少越多.氮减小 MOSFET 阈值电压的行为可能表明,在硅中的氮作为一种施主,将补偿硅表面的掺杂浓度,从而减小了 nMOSFET 和 pMOSFET 的阈值电压^[12].因此,氮注入量不能过高,否则,将严重影响 nMOSFET 和 pMOSFET 的开启特性.

3.3 氮对击穿电压的影响

表 2 所示的是二次退火方式下,未注氮与不同注氮剂量的前栅 pMOSFET 和 nMOSFET,漏源击穿电压 BV_{DSS} 和栅击穿电压的比较.分析表中数据可以看到,氮注入 SIMOX 材料后,将提高器件的漏源击穿电压 BV_{DSS} ,但对栅击穿电压影响较小.

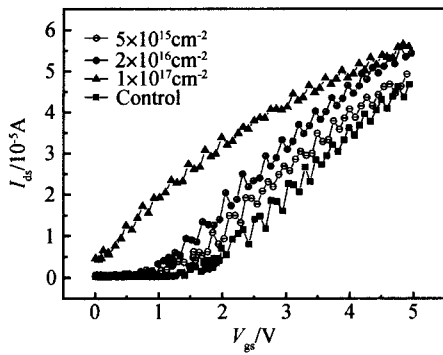


图 2 注氮与未注氮 nMOSFET 转移特性的比较

Fig. 2 Comparison of $I_{ds}-V_{gs}$ curves between non-nitrided and nitrided nMOSFETs

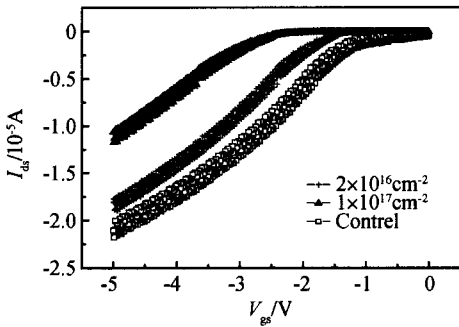


图 3 注氮与未注氮 pMOSFET 转移特性的比较

Fig. 3 Comparison of $I_{ds}-V_{gs}$ curves between non-nitrided and nitrided pMOSFETs

表 2 二次退火方式下注氮与未注氮 MOSFET 击穿电压的比较

Table 2 Comparison of breakdown voltage between the non-nitrided and nitrided MOSFETs

	BV _{DSS} / V		栅击穿电压/ V	
	nMOS	pMOS	nMOS	pMOS
对样品	5.95	- 11.50	27.7	- 28.8
$5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$	6.15	- 12.95	28.0	- 28.6
$8 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$	6.20	- 12.60	27.8	- 28.2
$2 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$	6.65	- 13.90	26.7	- 28.1
$1 \times 10^{17} \text{cm}^{-2}$	6.85	- 13.95	27.4	- 28.3

漏源击穿电压 BV_{DSS} 反映了沟道在未开启 ($V_{gs} = 0V$) 状态下,漏 p-n 结在漏源电压作用下的雪崩倍增击穿性质,同时也反映了漏区抗电压击穿的能力,属于电击穿电压(此时器件已经烧毁)。如果 BV_{DSS} 较大,表示漏 p-n 结抗雪崩倍增击穿能力较强。 BV_{DSS} 值的大小为工作电压 V_{DD} 的设置提供了参考(一般选 $V_{DD} = 2BV_{DSS}/3$)。漏源击穿电压与沟道掺杂浓度、陷阱电荷密度、栅氧厚度等有关。

栅介质击穿有两类:一类是低场击穿,主要由介质内的缺陷、杂质和针孔等引起,属于非本征击穿;一类是高场击穿(一般大于 $6MV/cm$)^[13],此类击穿主要是 Fowler-Nordheim 热载流子引起的大电流所造成,属于本征击穿。本文的栅击穿属于高场击穿,这是因为 nMOSFET 和 pMOSFET 的击穿场大于 $6MV/cm$ 。

由于氮能够引入大量的电子陷阱到 SIMOX 埋层中^[8,10],同时氮也有补偿 Si/SiO₂ 界面附近的硅悬挂键的作用^[14],因此,氮的注入将减少埋层中的固定正电荷密度,导致前栅晶体管的漏电流减小,从而提高了晶体管的漏源击穿电压。而氮对栅击穿电压影响较小的原因可能归结为, SIMOX 顶层硅中的氮由于器件工艺过程中高温的作用,一部分被反扩散到栅介质和栅介质/顶硅界面,在此处氮的作用主要是替换 Si-O 应力键而形成具有较高键能的 Si-N 键^[13,14],所以对电离辐射或低能电子对栅介质的损伤产生抑制作用。但是当栅介质接近本征击穿状态时,包括对低能电子和电离辐射不敏感的 Si-N 键也将被打断,因而氮在电离辐射或低能电子作用下所显示的优势不再存在,此时氮对造成栅击穿的陷阱俘获没有多大影响,因此栅介质的击穿电压受氮离子的影响甚微。

3.4 氮注入退火方式对 SIMOX 器件特性的影响

图 4~6 给出了一次退火与二次退火法的氮引入方式所制作的 nMOSFET 的 $I_{ds}-V_{gs}$ 和 $I_{ds}-V_{ds}$ 特性曲线。由图 4 可见,一次退火方式下的沟道截止(当 $V_{gs} = 0V$)漏电流远高于二次退火方式,并与氮注入剂量有关。图 5 和 6 的结果也表明,随栅源电压 V_{gs} 的增加,一次退火方式的漏电流增加很快, $I_{ds}-V_{ds}$ 特性没有饱和区。多次重复实验也进一步证实了这种现象。这表明氮注入的一次退火方式对 SIMOX 器件特性有不利的影响。其结果可能归结为,由于标准氧注入是高能大剂量 ($180keV, 1.8 \times 10^{18} \text{cm}^{-2}$) 注入,引入到 SIMOX 顶硅层的缺陷很多。常规的 SIMOX 材料制备方法是必须立即进行适当的退火以消除注入对顶硅层有源区的损伤。但一次退火注氮方式却没有这样的退火工艺步骤,而是紧接着再进行氮注入。这样,两次注入对顶硅层的损伤将可能叠加甚至放大。虽然氮注入后进行了退火处理,但远不能消除全氧注入和氮注入引入到 SIMOX 顶硅层的缺陷,因而导致前栅 $I-V$ 特性的变差。

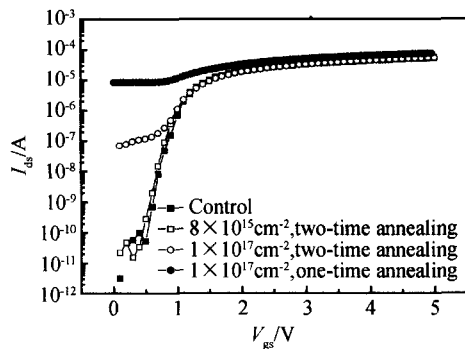


图 4 一次退火法与二次退火法注氮 nMOSFET 转移特性的比较

Fig. 4 Comparison of I_{ds} - V_{gs} curves between non-nitrided nMOSFETs and nitrided ones with different annealing methods

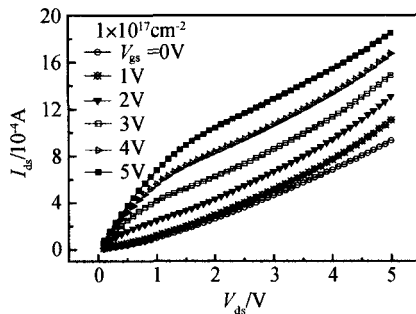


图 5 注氮(一次退火法)nMOSFET 的输出特性

Fig. 5 I_{ds} - V_{ds} curves of nitrided nMOSFETs (one-time annealing)

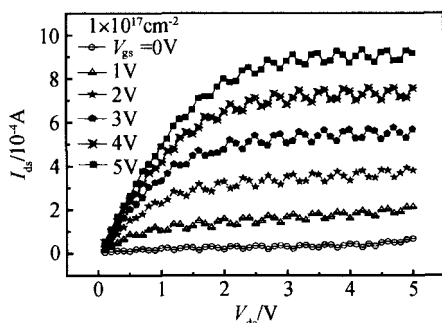


图 6 注氮(二次退火法)nMOSFET 的输出特性

Fig. 6 I_{ds} - V_{ds} curves of nitrided nMOSFETs (two-time annealing)

4 结束语

一定量的氮通过离子注入方式引入到 SIMOX 圆片的埋氧介质中, 然后进行适当的退火, 将减小 p 沟和 n 沟 MOSFET/SIMOX 的阈值电压; 氮注入能提

高 SIMOX 器件的漏源击穿电压, 但对栅击穿电压影响较小; 氮注入的二次退火方式有利于 SIMOX 器件 I - V 特性的改善, 但一次退火方式则相反. 用一定模型解释了实验结果.

参考文献

- [1] Brady F T, Li S S, Krull W A. A study of the effects of processing on the response of implanted buried oxides to total dose irradiation. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1990, 37(6): 1995
- [2] Lawrence R K, Ioannou D E, Hughes H L, et al. Charge trapping versus buried oxide thickness for SIMOX structure. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1995, 42(6): 2114
- [3] Warren W L, Shaneyfelt M R, Schwank J R, et al. Paramagnetic defect centers in BESOI and SIMOX buried oxides. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1993, 40(6): 1755
- [4] 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(6): 2189
- [5] Liu Xinyu, Sun Haifeng, Hai Chaohe, et al. 0.5 μ m CMOS/SOI device and circuit. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(5): 660 (in Chinese) [刘新宇, 孙海峰, 海潮和, 等. 0.5 μ m CMOS/SOI 器件和电路. *半导体学报*, 2001, 22(5): 660]
- [6] Chen Meng, Chen Jing, Zheng Wang, et al. Study of low dose SIMOX wafer. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(8): 1019 (in Chinese) [陈猛, 陈静, 郑望, 等. 低剂量 SIMOX 圆片研究. *半导体学报*, 2001, 22(8): 1019]
- [7] Liu Yunlong, Liu Xinyu, Han Zhengsheng, et al. Simulation of a novel Schottky body-contacted structure suppressing floating body effect in partially-depleted SOI nMOSFETs. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23(10): 1019
- [8] Barchuk I P, Kilchitskaya V I, Lysenko V S, et al. Electrical properties and radiation hardness of SOI system with multi-layer buried dielectric. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1997, 44(6): 2542
- [9] Mao B, Chen C, Pollack G, et al. Total dose hardening of buried insulator in implanted silicon-on-insulator structures. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1987, 34(6): 1692
- [10] Yi W B, Zhang E X, Chen M, 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: 1
- [11] Pennise C A, Boesch H E Jr, Goetz G, et al. Radiation-induced charge effects in buried oxides with different processing treatments. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1993, 40(6): 1765
- [12] Slawinski C, Mao B Y, Chang P H, et al. The Physical and electrical properties of buried nitride SOI structures synthesized by nitrogen ion implantation. *Proc Mater Res Soc*, 1986, 53: 269

- [13] Zhang Guoqiang ,Lu Wu ,Eierken ,et al. Breakdown characteristics in thin nitrated oxides. *Research & Progress of SSE*, 2002,22(3) :321 (in Chinese) [张国强,陆妩,艾尔肯,等. 薄栅氮化物的击穿特性. *固体电子学研究进展*,2002,22(3) :321]
- [14] Zhang Guoqiang ,Guo Qi ,Lu Wu ,et al. The chemical bonding model of nitrogen in nitrated MOS gate medium. *Research & Progress of SSE*,2002,22(3) :323 (in Chinese) [张国强,郭旗,陆妩,等. 含氮栅介质中 N 的结键模式. *固体电子学研究进展*,2002,22(3) :323]

Effects of Nitrogen on Electrical Characteristics of SIMOX Devices

Zhang Guoqiang¹, Liu Zhongli¹, Li Ning¹, Fan Kai¹, Zheng Zhongshan¹,
Zhang Enxia², Yi Wanbing², Chen Meng², and Wang Xi²

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

(2 *Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200500, China*)

Abstract : Effects of nitrogen on the electrical characteristics of SIMOX devices are investigated. The experimental data show that by implanting a proper dose of nitrogen ions into the buried oxide of SIMOX wafers ,the threshold voltages of n channel and p channel MOSFET/ SIMOX decrease ,and the drain-source breakdown voltages of nMOSFETs and pMOSFETs increase ,but the gate breakdown voltage changes little. Nitrogen implantation processes play a very important role in the electrical performance of the nitride SIMOX devices.

Key words : SIMOX; MOSFET; nitrogen

EEACC : 2570D; 2560R

Article ID : 0253-4177(2005)04-0835-05