

# 形成 SIMOX 结构的 PIII 新技术的研究

闵 靖, P. K. Chu, Y. C. Cheng

(香港城市大学物理和材料科学系 香港九龙达之路 83 号)

J. B. Liu, S. Iyer, N. W. Cheung

(Department of Electrical Engineering and Computer Sciences,  
University of California, Berkeley, CA94720, USA)

**摘要** 本文报道了一种形成 SIMOX 结构的等离子体浸没离子注入(PIII)的新技术. 与传统的离子注入相比, 这种新技术具有高离子束流, 大面积离子注入, 极短的注入时间和低成本等优点. 实验中, 衬底硅片浸没在高离子密度的氧的等离子体中. 在衬底所加的负高压的作用下, 氧离子直接注入硅片之中. 我们研究了 PIII 的工艺条件, 用 PIII 制得了具有 20 到 50nm 厚的顶层硅层和 20 到 50nm 厚的氧化硅埋层的超薄 SIMOX 硅片, 并用 RBS、XTEM 等技术对样品进行了测试.

EEACC: 2530F, 2550B

## 1 引言

SOI (Silicon On Insulator) 材料是制作抗辐照电子器件和高速 CMOS 电路的理想衬底<sup>[1]</sup>. 与体硅相比, SOI 材料大大地简化了隔离工艺, 提高了集成度, 并消除了 Latch-up 效应. 用氧离子直接注入, 然后经高温退火而形成的 SIMOX (Separation by Implantation of Oxygen) 是 SOI 领域中领先的技术. 但是要使 SIMOX 材料在制作商用集成电路方面成为可竞争的材料, 还必须大大地降低材料的成本. 低能、低剂量离子注入是对传统的离子注入技术的重大改进. 它一方面为制备高质量、低缺陷超薄 SIMOX 材料提供了一种很好的技术, 另一方面它减少了注入时间, 从而降低了成本. 从器件角度看, 随着集成电路的发展, 全耗尽 CMOS 电路无论是在增益、速度还是在工作的温度和功耗方面都显示了突出的优点. 全耗尽 CMOS 电路尤其是深亚微米 ULSI 对硅材料提出了新的要求, 从而使人们关注于一种超薄顶层硅层 (<50nm)、超薄埋入氧化层 (<50nm) 的超薄 SIMOX 材料. 低能、低剂量离子注入为超薄 SIMOX 材料提供了一种制备技术.

闵 靖 男, 1941 年生, 现在复旦大学材料科学研究所 (上海 200433) 任高级工程师, 从事半导体材料和器件工艺研究

Paul. K. Chu (朱剑豪) 男, 1956 年生, 博士, 现为 Evans Asia 公司总裁, 香港城市大学访问教授, 北京大学研究教授, 复旦大学顾问教授

1994 年 8 月 22 日收到初稿, 1994 年 12 月 23 日收到修改稿

最近,我们研究了一种等离子体浸没离子注入(PIII:plasma Immersion Ion Implantation)新技术,另辟新径,用于制备超薄 SIMOX 材料. PIII 又称等离子体源离子注入(PSII:plasma Source Ion Implantation). 最初是 Conrad 等人提出来并用于金属材料表面改性的. 近几年来我们已逐步地把它应用于 VLSI 领域. 例如:100nm p<sup>+</sup>/n 结的注入<sup>[4]</sup>,非平面器件结构的共形掺杂<sup>[5]</sup>,背损伤吸杂<sup>[6,7]</sup>和金属内引线无电极选择镀<sup>[8]</sup>等等. PIII 具有突出的优点:(1)设备简单,易运行和易维修:无质量选择装置、无离子束扫描装置,(2)具有高密度离子(10<sup>10</sup>—10<sup>11</sup>/cm<sup>3</sup>)的等离子体,离子注入束流可达 10<sup>16</sup>/cm<sup>2</sup>·s,(3)大面积注入,(4)极短的注入时间,(5)低成本. 所以和传统的制备 SIMOX 材料的束线离子注入相比,PIII 在很多方面显示了它的优越性. 例如:我们用 PIII 完成对直径 100mm 硅片的氧离子注入仅需 5 分钟,而在同样的时间内,用平常用的 1mA 离子注入机仅能注入 1cm<sup>2</sup> 的面积. 在我们的实验中,PIII 比传统的离子注入快 75 倍. 这表明用 PIII 大幅度地缩短了注入时间,大大地降低了成本.

## 2 实验

### 2.1 PIII 的工作原理

当脉冲或直流高压负偏压加在衬底上时,衬底附近的电子在 10<sup>-9</sup>s(电子等离子体频率的倒数  $\omega_e^{-1}$ )的时间内被排斥,从而留下密度均匀的离子鞘层(ion-matrix sheath). 在等离子体边界与负偏置的衬底之间的离子鞘层能承受数万伏的电压. 鞘中的正离子受负偏置的衬底的吸引,于 10<sup>-6</sup>s(离子等离子体频率的倒数  $\omega_i^{-1}$ )内加速注入衬底. 离子的运动降低了鞘中的离子密度,因而鞘与等离子体的边界不断扩张,补充入更多的离子,以维持所加的电压,直到形成动态平衡的稳态离子鞘层.

Lieberman<sup>[9]</sup>在非碰撞条件下建立了 PIII 的解析模型. 在低气压(~0.13Pa)下工作的 PIII 正好能满足此非碰撞的假设. 若所加的偏压为  $V_s(t)$ ,则可得离子电流密度  $j(t)$ 为:

$$j = \frac{4}{9} \epsilon_0 (2q/M)^{1/2} V_s^{3/2} / S^2 \quad (1)$$

其中: $\epsilon_0$  是真空介电常数, $q$  是离子电荷, $M$  是离子质量, $S(t)$  是离子鞘层的厚度.

对于具有等离子体密度  $n_0$  和电子温度  $T_e$  的等离子体,离子电流密度又可表示为:

$$j = qn_0 \left( \frac{ds}{dt} + u_b \right) \quad (2)$$

其中  $u_b$  是 Bohm 离子声学速度.

由表示式(1)和(2)可得:

$$qn_0 \left( \frac{ds}{dt} + u_b \right) = \frac{4}{9} \epsilon_0 (2q/M)^{1/2} V_s^{3/2} / S^2 \quad (3)$$

通过解这个一阶微分方程,可得离子鞘层的厚度. 从而可确定能量的分布和离子束流.

注入衬底中的离子的能量和角度分布完全由气体的气压,负偏压,离子的电荷状态和衬底的形状所决定.

### 2.2 PIII 的装置

图 1 是 PIII 装置的示意图. 此系统由电子回旋共振(ECR:Electron Cyclotron Resonance)等离子体源室、工艺室、微波功率源、真空系统、供气和配气系统及等离子体诊断仪器等

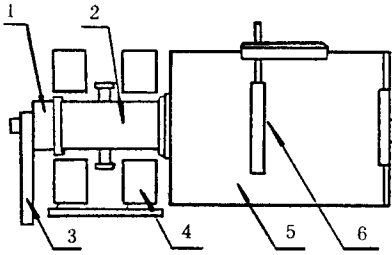


图1 PIII的装置

1. 环形转换器, 2. ECR源室 3. 矩形波导  
4. 电磁体, 5. 工艺室, 6. 衬底夹具

部分所组成. ECR源室和工艺室是铝制的. 在工艺室内有一个夹衬底硅片的夹具. 夹具可以夹持直径大到200mm的硅片. 一个脉冲或直流的偏置电源(可加到10万伏高压)与夹具相连接. 在衬底加偏压时, 源室、工艺室及控制系统处于地电位, 运行十分安全. 工艺室外排列着永久磁铁, 以改善等离子体空间分布的均匀性, 在ECR源室和工艺室的侧面有若干预留窗. 通过预留窗, 可以用摄像机监控工艺过程, 也可安置不同的等离子体诊断探头, 以满足诊断和研究工作的需要. 真空系统由1000 l/s的涡轮分子泵和机械泵所

组成. 在通入工作气体之前, 系统保持  $1.3 \times 10^{-5}$  Pa 的真空度. 配有质量流量计的供气和配气系统, 用于精确地控制工作气体的压力. 通常所用的等离子体诊断仪器是Langmuir探针和光发射谱仪. 前者用于测量等离子体密度和电子温度, 后者用于测试等离子体中的离子成分. 我们使用2.54GHz的微波源, 其输出功率从0—800W可调. 微波通过TE<sub>10</sub>矩形波导传到TM<sub>01</sub>环形转换器, 再经石英输入内径为14cm, 长40cm的源室. 源室中的工作气体在微波和源室外两组串联的电磁线圈产生的  $875 \times 10^{-4}$  T 的磁场作用下, 因电子回旋共振而形成高密度的等离子体. 在源室中产生的等离子体扩散进入内径为43.2cm, 长为81cm的工艺室, 在此进行离子注入.

### 2.3 实验

我们用直径100mm, p型<100>C<sub>2</sub>抛光硅片作为衬底, 其电阻率为5—12Ω·cm.

已注入的样品用LPCVD在表面淀积一层厚于500nm的二氧化硅或溅射大约100nm的氮化硅, 然后在氮气中, 1250—1300℃温度下退火2—6小时.

对已注入的和退过火的样品, 用RBS和XTEM等方法进行测试分析.

在PIII氧离子注入时, 我们使用的偏压范围是25—50kV. 利用串联在偏压源电路中的电流表监控注入电流, 以便控制注入剂量. 注入时所用的电流密度为0.3—1mA/cm<sup>2</sup>, 剂量率可接近于  $10^{16}$ /cm<sup>2</sup>·s. 在其它参数受控的情况下, 注入的剂量可简单地由时间来控制.

我们用氧气作为工作气体. 在PIII设备上, 测得了氧气的直流击穿电压与氧气压力的关系曲线, 如图2所示. 为了避免氧在高压电场下被击穿, 在进行氧离子注入时, 必须把氧气的压力维持在  $1.3 \times 10^{-2}$  Pa, 即工作在图2斜线所示的工作区域内.

### 3 结果和讨论

等离子体中的离子密度是微波功率、磁场强度和气体压力的灵敏函数. 可用Langmuir探针来测试离子密度. 在微波功率

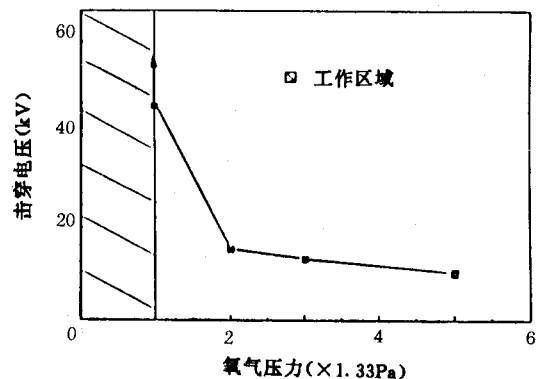


图2 氧气的直流击穿电压与气体的压力

500—800W 时,衬底前方附近的离子密度为  $10^{10}—10^{11}/\text{cm}^3$ 。

以氧为工作气体时,在等离子体中含有  $\text{O}^+$  和  $\text{O}_2^+$  离子. 它们同时被注入到衬底硅中. 由于它们的质量不同,在同样的加速电场下,注入到硅中的投影射程不同, $\text{O}_2^+$  比  $\text{O}^+$  的投影射程短. 图 3 是由 RBS 测得的注入的氧在硅中的深度分布(图 3,4,5 见图版 I). 所见的两个峰分别代表注入的  $\text{O}^+$  和  $\text{O}_2^+$ . 必须优选工艺参数,使  $\text{O}_2^+$  在氧的等离子体中的含量小于 10%。

由注入时的电流密度可以计算出氧的注入剂量. 但计算值往往比用 RBS 测得的值大. 所以只能把计算值作为估计氧注入剂量的上限值. 在我们的工艺条件下,用 RBS 测得的氧离子注入剂量在  $7 \times 10^{16}—3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$  范围内。

图 4 是已注入氧而未退火的样品的 RBS/沟道 $\langle 100 \rangle$ 定向谱. 样品注入时的偏压为 25kV,刚开始注入时衬底的温度为  $450^\circ\text{C}$ ,注入时间为 90s,剂量是  $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ . 此时埋入氧的峰值位于表面下约 20nm 处。

我们用 PIII 制得了具有 20—50nm 厚顶层硅层和 20—50nm 厚埋入氧化层的超薄 SIMOX 材料. 一般注入为 3—10 分钟. 这种 SIMOX 材料的分析测试的结果将另文介绍。

图 5 是用 PIII 制备的 SIMOX 样品的 XTEM 像. 样品在注入时所加的偏压为 50kV. 测得注入的氧的剂量是  $3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ . 注入后的样品表面经溅射覆盖一层 100nm 厚的氮化硅膜. 然后在氮气气氛中,于  $1270^\circ\text{C}$  温度下退火 2.5 小时. 由 XTEM 观察可知此 SIMOX 结构的顶层硅厚 25nm 左右,埋入二氧化硅层厚度为 20—30nm。

#### 4 结论

我们发展了一种不同于传统束线离子注入的制备 SIMOX 材料的新颖 PIII 技术. 研究结果显示此技术能用于制备超薄 SIMOX 材料. 与传统的离子注入相比,PIII 具有大面积注入,注入时间短和成本低等优点,在制造低成本的商用 SIMOX 材料方面可能会产生重大的突破。

#### 参 考 文 献

- [1] K. Izumi, *Vacuum*, 1990, **42**:333.
- [2] J. R. Conrad *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 1987, **62**:4591.
- [3] J. Tendys *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**:2143.
- [4] E. C. Jones and N. W. Cheung, *IEEE Electron Device Lett.*, 1993, **14**(9):444.
- [5] C. Yu, Z. Huang and N. W. Cheung, *Proc. of 9th Int. conf. On Ion Implantation*, 1992, 369.
- [6] H. Wong *et al.*, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 1989, **147**:91.
- [7] X. Y. Qian *et al.*, *Proc. ECS Symp. on Ion Implantation for Elemental and Compound Semiconductor*, 1990, **90**(13): 268.
- [8] M. H. Kiang *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**:2767.
- [9] M. A. Lieberman, *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**:2926.

## New Development of PIII for SIMOX Structure

J. Min, P. K. Chu, Y. C. Cheng

*(Department of Physics and Materials Science, City University  
of Hong Kong, 83 Tat Avenue, Kowloon, Hong Kong)*

J. B. Liu, S. Iyer and N. W. Cheung

*(Department of Electrical Engineering and Computer Sciences,  
University of California, Berkeley, CA94720, USA)*

Received 22 August 1994, revised manuscript received 23 December 1994

**Abstract** A novel technique for SIMOX structure has been developed by using Plasma Immersion Ion Implantation (PIII). Some of the advantages are high ion flux, large area implantation, short implantation time and low costs compared to conventional ion implantation. In PIII, the silicon substrate is immersed in a high ion density plasma from which oxygen ions are implanted into the substrate by a high negative bias. The parameters of PIII were optimized and a 20 to 50nm thick buried oxide layer with a silicon overlayer thickness of 20 to 50nm was fabricated by PIII. The resulting wafers were analyzed by using a variety of technique, including RBS and XTEM.

**EEACC:** 2530F, 2550B