

SOIM 新结构的制备及其性能的研究^{*}

谢欣云 林 青 门传玲 刘卫丽 徐安怀 林成鲁

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

(2002 年 4 月 19 日收到; 2002 年 6 月 2 日收到修改稿)

制备在以 SiO₂ 为绝缘埋层的 SOI 材料上的电子器件存在着自加热问题. 为减少自加热效应和满足一些特殊器件/电路的要求, 利用多孔硅外延转移技术制备出以二氧化硅和氮化硅为多绝缘埋层的 SOI 新结构. 高分辨率透射电镜和扩展电阻测试结果表明得到的 SOIM 新结构具有很好的结构和电学性能, 退火后的氮化硅埋层为非晶结构.

关键词: 氮化硅薄膜和二氧化硅薄膜, SOIM 新结构, 多孔硅外延转移

PACC: 6855, 7340T

1. 引 言

为使器件之间具有很好的电绝缘隔离性能和有效的降低寄生电容, 氧化物埋层已被广泛的应用在 SOI (silicon-on-insulator) 技术中. 然而, 由于 SiO₂ 导热性能差, 在很大程度上限制了 SOI 材料在高温与大功耗电路中的应用^[1]. Si₃N₄ 薄膜具有较高热导率 (与 SiO₂ 薄膜热导率之比为 30Wm⁻¹K⁻¹ 比 1.4Wm⁻¹K⁻¹), 并且具有在氢氟酸溶液中低的腐蚀速率以及良好的结构性能, 是一种很好的绝缘材料. 同厚度的以 Si₃N₄ 和 SiO₂ 为多绝缘埋层的 SOI 新结构展示了比普通 SOI 结构更好的热性能^[2]. 因此, 引入 Si₃N₄ 层到 SOI 结构中形成 SOIM (silicon-on-insulator-multi-layer) 新结构, 从而降低 SiO₂ 层的厚度, 是一种减少自加热效应的有效方法.

采用氮氧离子共注入方法, 由于氮在硅中扩散率很低, 以及退火后氮化硅埋层会重结晶, 很难得到质量好的以氮化硅和氧化硅为埋层的 SOIM 新结构^[3,4], 并且在注氮过程中注入的氮离子会对顶层硅造成很大损伤, 引入缺陷^[5]. 本文采用多孔硅外延转移的方法^[6] 成功的制备出以 SiO₂ 和 Si₃N₄ 为双绝缘埋层的 SOIM 新结构. 利用高分辨率透射电镜 (XTEM) 和扩展电阻 (SPR) 测试得到的 SOIM 样品, 实验结果表明采用这种方法制备的这种新结构具有很好的结构和电学性能.

2. 实 验

本实验采用 p 型 $\phi 3''$ (100)、电阻率为 0.003—0.007 $\Omega \cdot \text{cm}$ 的重掺杂硅片. 其中一片用低压化学气相沉积法在 800 $^{\circ}\text{C}$ 条件下生长一层 Si₃N₄ 薄膜, 薄膜厚度为 70nm. 另一片利用阳极氧化的方法在其表面形成多孔硅. 实验条件为: 电介质采用 HF/C₂H₅OH, 溶液的浓度比为 HF:C₂H₅OH = 1:1, 电流密度为 4mA/cm², 时间为 5min, 制备时均无光照. 为了保证多孔硅结构的稳定性, 在外延前将多孔硅在 400 $^{\circ}\text{C}$ 的氧气氛下预氧化 1h, 将表面的氧化层去除后在超高真空电子束蒸发室中外延硅, 衬底温度为 800 $^{\circ}\text{C}$. 在外延生长了单晶硅的衬底片上继续用电子束蒸发沉积一层 120nm 厚的二氧化硅层, 衬底温度保持为 200 $^{\circ}\text{C}$. 将外延长与长有 Si₃N₄ 的硅片在室温下键合, 为了增强键合界面的强度, 将键合片在 1100 $^{\circ}\text{C}$ 下退火 1h. 将刀片插入硅片和氮化硅片的间隙后, 键合片在多孔硅处分离, 这样外延单晶硅层和氧化硅层就转移到氮化硅片上了. 为了将外延层上的残余多孔硅去除, 将试样放入一定浓度 HF/H₂O₂ 溶液, 加上超声波振荡, 多孔硅很快溶解.

在对键合片表面进行清洗时, 由于氮化硅片的表面粗糙度受 RCA 清洗液中氨水浓度影响很大, 因此与一般的硅片清洗液不同. 此处所用到的氨水浓度应该是标准 RCA 清洗液中氨水浓度的 25%. 而且

^{*} 国家重点基础研究专项经费 (批准号: G20000365) 与国家自然科学基金 (批准号: 69976034) 资助的课题.

在键合之前把清洗后的氮化硅片还需放入 1% 的 HF 溶液中浸泡 10s 进行新水化处理^[7]。

本实验利用原子力显微镜 (AFM) 测试键合面的粗糙度; 用透射电镜对所得到的 SOIM 样品进行结构和外延单晶硅质量分析, 低分辨率透射电镜图像表征样品的四层结构, 高分辨率透射电镜图像显示各层之间的界面情况, 以及顶层外延硅的质量. 扩展电阻用来测量样品电学性质随厚度变化的情况.

3. 实验结果

当表面粗糙度大于一定值时, 两个表面就无法在室温下键合. 比较厚的氮化硅薄膜表面由于粗糙度很高, 在键合之前一般需要化学机械抛光, 当氮化硅薄膜厚度小于 200nm 时, 不需要抛光就可以进行与其他表面的键合. 本实验用原子力显微镜测试经修改的 RCA 液清洗后的氮化硅表面粗糙度, 表面形貌如图 1(a) 所示, 表面粗糙度 $\langle R_a \rangle$ 为 0.338nm. 经标准 RCA 液清洗后的二氧化硅表面粗糙度 $\langle R_a \rangle$ 为 0.774nm, 表面形貌如图 1(b) 所示. 从这两个表面的低粗糙度可以看出用以上方法得到的氮化硅和二氧化硅薄膜可以不经化学机械抛光而直接进行键合.

图 2 是单晶 $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ 衬底结构的低分辨率透射电镜照片. 从照片中可以看出顶层硅、埋层二氧化硅和氮化硅的厚度分别约为 200nm, 120nm 和 70nm. 键合界面很清楚, 上界面和下面界非常平坦和陡峭. 图 3(a), (b) 和 (c) 分别为上界面、二氧化硅与氮化硅之间的界面以及下界面的高分辨率透射电镜图片. 透镜结果显示 Si_3N_4 薄膜为非晶态, 并且没有发现空洞或者气泡存在于该层中. 非晶态的 Si_3N_4 非常适合作为 SOI 结构的绝缘埋层, 因为非晶态 Si_3N_4 可以避免多晶态 Si_3N_4 存在的漏电和容易机械碎裂等问题. 另外, 非晶态氮化硅的禁带宽度大于 SiO_2 的禁带宽度, 因而以二氧化硅和氮化硅为埋层的 SOIM 材料可进一步提高其抗辐照能力. 从图 3(a) 可以得出外延单晶硅晶格取向为 (100), 顶层硅具有与衬底硅相同的晶体质量.

为研究这种新结构的电学性能, 我们测试了样品的扩展电阻值 (图 4). 从图中可看出, 这个样品的多层结构, 包括顶层硅、绝缘埋层以及衬底硅都能被清晰地区分出来. 在 210nm 处电阻值的突变, 表明顶层 Si/SiO_2 界面是非常陡峭的. 这个扩展电阻测试结果表明外延硅具有均匀的电学性能, 氮化硅和二氮

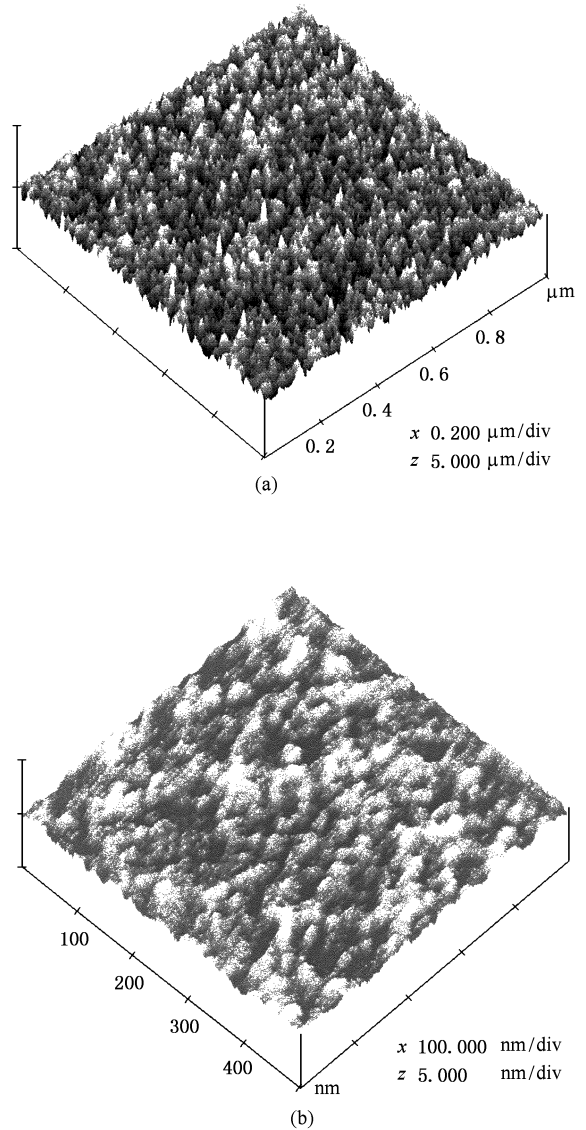


图 1 原子力显微镜照片 (a) Si_3N_4 ($1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$); (b) 外延单晶硅 ($0.5\mu\text{m} \times 0.5\mu\text{m}$)

化硅具有很好的绝缘性能. 另外, 在这个图中所得到的顶层硅和绝缘层的厚度值与 XTEM 所显示的厚度值是相同的.

4. 分析与结论

本工作利用多孔硅外延转移技术制备出以二氧化硅和氮化硅为埋层的 SOIM 新结构. 两键合表面为二氧化硅和氮化硅. 图 5 是键合能随退火温度之间的变化关系^[8]. 从图中可看出, Si/SiO_2 键合能强于 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 键合能. $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 结构的键合机制与 Si/SiO_2 结构的键合机制存在一定区别, $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 结构

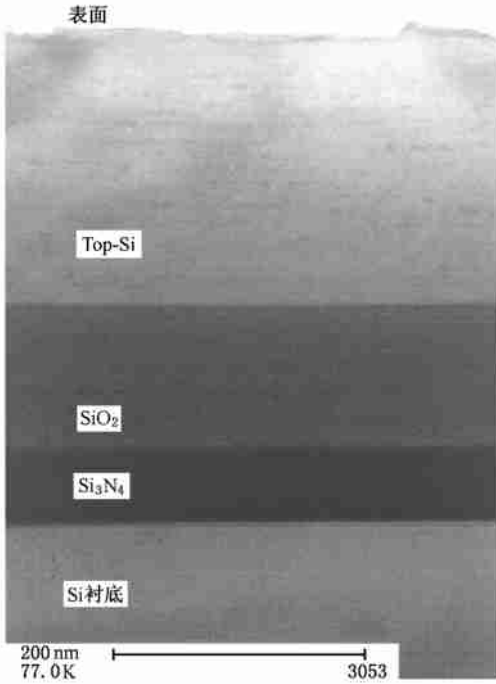


图 2 SOIM 结构的低分辨率透射电镜照片

在三个不同温度范围内的键合机制如下:

$T < 300\text{ }^\circ\text{C}$, Si-OH 键的峰强度大量的降低.

$300\text{ }^\circ\text{C} < T < 900\text{ }^\circ\text{C}$, Si-OH 键的峰强度慢慢降低, 说明脱水反应还在继续.

$T > 900\text{ }^\circ\text{C}$, Si-OH 键的峰强度仍慢慢降低, NH 和 SiH 峰强度有少量提高. 这可解析为水分解导致氢的浓度稍微提高, 然后与氢和氮联结在一起, 这些键分布在键合界面和共价键内部.

在这个温度范围内共价键形成, 因而具有很强的键合能. XTEM 和 XRP 测试结果表明制备的 SOIM 样品具有很好的结构和电学性能. 因此, 用多孔硅外延转移方法制备这种新结构的是很有前途的. 由于这种新结构中氮化硅埋层的热导率比较高, 而且其禁带宽度比二氧化硅大, 因而有利于减少器件/电路的自加热效应和提高抗辐照能力. 在这里的 SiO₂ / Si₃N₄ 双绝缘埋层都是非晶态, 而非晶态的 SiO₂ 与 Si₃N₄ 热膨胀系数相差并不很大, 完全可以适应以后制作器件/电路工艺过程中的多次热处理, 并且我们在制备 SOIM 这种新材料过程中, 已经经过了 1100 °C 的高温热退火, 退火后样品的键合界面非常好. 因此, 制备得到的这种新 SOIM 材料将在需要考虑热效应和需要良好热扩散的微电子和微技术领域中得到很好的应用.

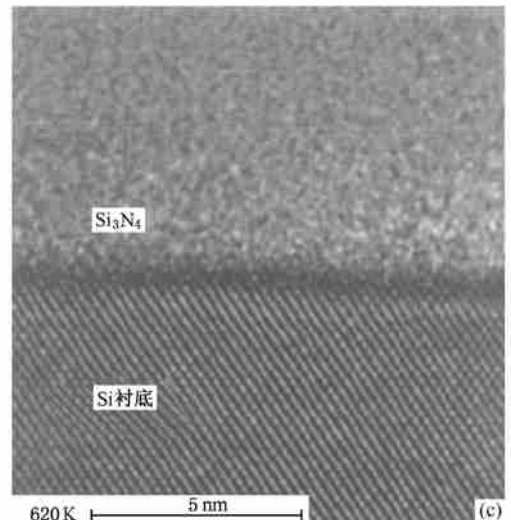
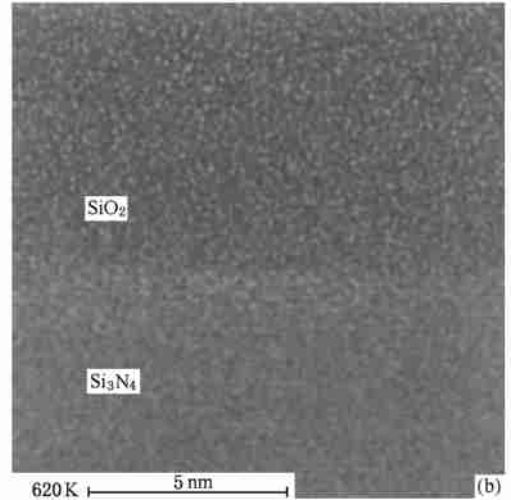
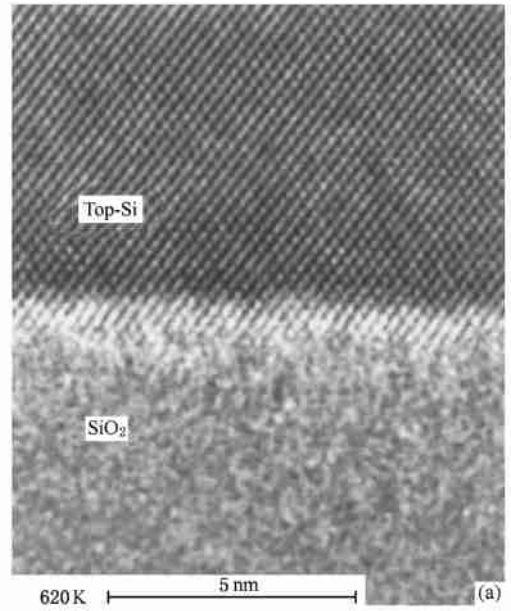


图 3 SOIM 结构的高分辨率透射电镜照片 (a) 顶层 Si/Si₃N₄ 界面; (b) 埋层 SiO₂/Si₃N₄; (c) Si₃N₄/Si 衬底

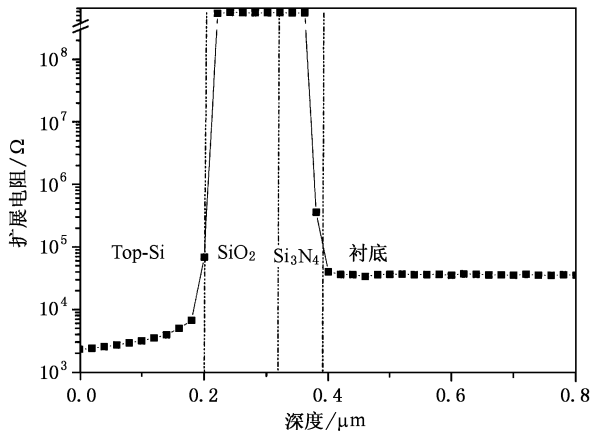


图4 SOIM 结构的扩展电阻曲线

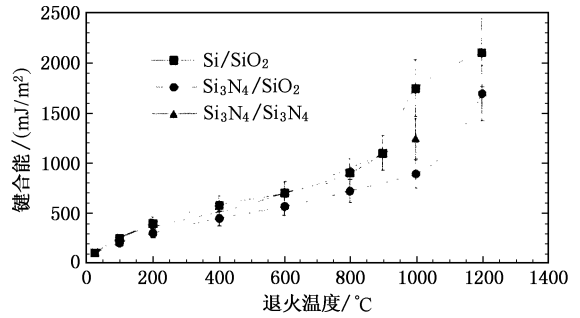


图5 键合能随退火温度之间的变化关系

- [1] Amod E, Pein H, Herko S P 1994 *Proc IEDM* 94 p813
- [2] Roig J, Fbres D, Vellvehi M, Rebollo J and Millan J 2002 *Microelectronics Reliability* **42** 61
- [3] Reeson K J 1997 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **19/20** 269
- [4] Reeson K J, Hemment P L F, Meekison C D, Marsh C D, Bookie G D and Chater R J 1988 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **32** 427
- [5] Lu D T, Huang D and Heiner Rysse 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 185 (in Chinese)[卢殿通, 黄 栋, Hiner Rysse 2001 *物理学报* **50** 185]
- [6] Yonehara T, Sakaguchi K and Sato N 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 2108
- [7] Bower R W and Ismail M S 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 3485
- [8] Maszara W P, Goetz G, Cviglia A and Me Kiterick J B 1988 *J. Appl. Phys.* **64** 4943

Fabrication of silicon-on-insulator-multilayer structure by epitaxial layer transfer^{*}

Xie Xin-Yun Lin Qing Men Chuan-Ling Liu Wei-Li Xu An-Huai Lin Cheng-Lu

(State Key Laboratory of Functional Material and Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

(Received 19 April 2002; revised manuscript received 2 June 2002)

Abstract

Due to the very low thermal conductivity of the thick-buried oxide layer, the silicon-on-insulator(SOI) power devices have an inherent self-heating effect, which limits their operation at high current level. Adopting the new silicon-on-insulator-multilayer (SOIM) structures is a good solution to reduce the self-heating effect. In this paper, the SOIM structures were successfully produced by electron beam evaporation of silicon on porous silicon and epitaxial layer transfer. The quality of the structures was investigated by XTEM and SRP. Experimental results show that the buried Si₃N₄ layer is amorphous and the new SOIM sample has good structural and electrical properties.

Keywords: SiO₂ and Si₃N₄ films SOIM, epitaxial layer transfer

PACC: 6855, 7340T

^{*}Project supported by the Special Funds for Major State Basic Research Project (Grant No. 20000365) and by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69976034).