

薄膜厚埋层 SOI 材料的新制备技术*

魏 星^{1,2,3,†} 王 湘³ 陈 猛³ 陈 静¹ 张 苗^{1,3} 王 曦^{1,3} 林成鲁³

(1 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)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

(3 上海新傲科技有限公司, 上海 201821)

摘要: 在结合低剂量注氧隔离(SIMOX)技术和键合技术的基础上,研究了制备薄膜(薄顶层硅膜)厚埋层 SOI 材料的新技术——注氧键合技术.采用该新技术成功制备出薄膜厚埋层 SOI 材料,顶层硅厚度 130nm,埋氧层厚度 1 μ m,顶层硅厚度均匀性 $\pm 2\%$.并分别采用原子力显微镜(AFM)和剖面透射电镜(XTEM)对其表面形貌和结构进行了表征.研究表明,SIMOX 材料顶层硅通过键合技术转移后仍能够保持其厚度均匀性,且埋氧层和顶层硅之间具有原子级陡峭的分界面,因此注氧键合技术将会是一项有广阔应用前景的 SOI 制备技术.

关键词: 薄膜厚埋层 SOI 材料; 注氧键合技术; 剖面透射电镜

PACC: 0779; 7340T; 7360F

中图分类号: TN304.1⁺2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)07-1350-04

1 引言

与体硅器件相比,绝缘体上硅(SOI)器件具有高速、低驱动电压、耐高温、低功耗以及抗辐照等优点^[1],备受人们的关注,在材料和器件的制备方面都得到了快速的发展.根据埋氧层厚度,SOI 材料可分为厚埋层 SOI 材料和薄埋层 SOI 材料,其中厚埋层 SOI 材料在高压功率器件、微机电系统(MEMS)、汽车电子等领域得到了广泛的应用.目前,SOI 材料的制备技术主要有注氧隔离技术(SIMOX)、键合减薄技术、智能剥离技术(smart-cut).其中,由于键合减薄技术具有工艺简单、成本低等优点,受到人们的重视.虽然埋氧层厚度连续可调,但是通过研磨或者腐蚀的办法减薄顶层硅,顶层硅的厚度均匀性很难得到精确控制.如 Mumola 等人^[2]在顶层硅厚度为 $1 \pm 0.3 \mu\text{m}$ 键合减薄 SOI 材料的基础上,采用计算机控制局部等离子减薄的特殊办法,将顶层硅减薄到 $0.1 \mu\text{m}$,平整度仅能控制在 $\pm 0.01 \mu\text{m}$,这也就限制了键合减薄 SOI 材料在对顶层硅厚度均匀性要求高等方面的应用.而采用 SIMOX 技术制备的 SOI 材料,虽然具有优异的顶层硅厚度均匀性,但由于受到注入剂量和能量的限制,埋氧层最大厚度很难超过 400nm,并且 SIMOX 工艺是利用高温退火,促进氧在硅片内部聚集成核而形成连续埋氧层,但是埋氧层中存在的针孔使其绝缘性能不如热氧化形成的 SiO_2 ,击穿电压仅 6MV/cm 左右,这些缺点限制了 SIMOX 材料在厚埋层(大于 400nm)方面的应用. Smart-cut 技术在键合技术的基础上发展而来,并且其顶层硅的厚度由氢离子的注入能量所决定,其厚度连续可调,因此该技术可以同时满足埋氧层厚度和顶层硅均匀性的要求,但是该技术具有极强

的专利保护范围.基于 SIMOX 技术和键合减薄技术本质上的互补性,本文结合这两项技术各自的优点提出了注氧键合技术,并对该技术进行了研究,成功制备了薄膜厚埋层 SOI 材料.

2 实验

实验采用 125mm p 型(100)Cz 硅片制备器件片,125mm n 型(100)Cz 硅片作为支撑片.首先利用 SIMOX 技术制备出器件片,与氧化后的支撑片键合,将键合后的器件片和支撑片在 1100 $^{\circ}\text{C}$ 下加固 3h,研磨器件片,背面的残余硅层厚度减薄至 $4 \mu\text{m}$,然后利用氢氧化四钾铵(TMAH)溶液去除器件片背面的残余硅层,TMAH 溶液将在器件片的埋氧层自动停止,再使用氢氟酸(HF)溶液去除器件片的埋氧层,HF 溶液将在 SOI 层自停止,实现 SOI 层的转移,制备出初始薄膜厚埋层 SOI 材料.并采用化学机械抛光(CMP)进行精细抛光,最终得到薄膜厚埋层 SOI 材料.

实验采用剖面透射电镜(XTEM; PHILIPS CM200FEG)和 Cu-plating 对 SIMOX 材料结构和埋氧层质量进行了表征.并且为检验实验制备出的薄膜厚埋层 SOI 材料的表面形貌和材料结构,首先采用原子力显微镜(AFM; Veeco D3100)对制备出的薄膜厚埋层 SOI 材料表面形貌进行了分析,然后采用 XTEM 和高分辨率透射电镜(HR-TEM)对薄膜厚埋层 SOI 材料的顶层硅和埋氧层结构进行了表征.

3 结果与讨论

3.1 SIMOX 材料的制备

实验所用的薄膜厚埋层 SOI 材料制备技术中,SI-

* 国家自然科学基金资助项目(批准号:60476006)

† 通信作者. Email: xwei@mail.sim.ac.cn

2008-01-04 收到,2008-02-09 定稿

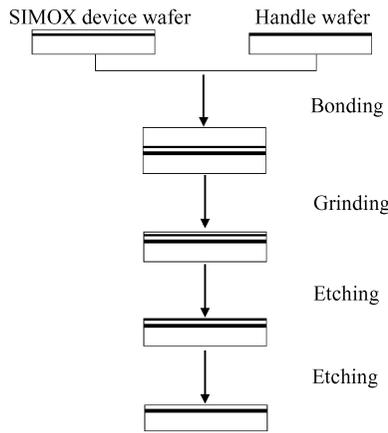


图 1 注氧键合技术制备薄膜 SOI 材料流程

Fig.1 Process flow of fabricating thin film/thick box SOI material with SWB technology

MOX 材料埋氧层作为腐蚀截止层,能否阻挡住 TMAH 溶液的腐蚀将对所制备的薄膜厚埋层 SOI 材料质量有直接影响,因此应在注入剂量尽可能小的情况下形成连续无硅岛的埋氧层.考虑到形成连续埋氧层时氧离子的注入能量和剂量窗口^[3],选择注入能量为 160~200keV,注入剂量为 $(2\sim5)\times 10^{17}\text{cm}^{-2}$,注入温度 550~600℃,原注入片在 1300℃ Ar + O₂ (5%)气氛中退火 8h,制备出器件片.典型的器件片表面热氧化 SiO₂ 层、顶层硅和埋氧层厚度分别为 400,170 和 130nm.图 2 为相应的器件片 XTEM 照片,可见该器件片埋氧层连续,视界内无硅岛出现,埋氧层和顶层硅的厚度均匀. Cu-plating 测试结果表明埋氧层中的针孔密度小于 0.1cm^{-2} ,以上测试结果表明埋氧层质量良好.

3.2 器件片与支撑片的键合

本文作者采用了 SiO₂/SiO₂ 的键合方式,这是由于一般的低剂量 SIMOX 材料表面粗糙度 RMS 值远大于 SIMOX 材料表面热氧化 SiO₂ 层的表面粗糙度 RMS 值.图 3 所示为 SIMOX 材料顶层硅表面及其表面热氧化 SiO₂ 层的 AFM 照片,扫描范围 $5\mu\text{m}\times 5\mu\text{m}$,表面粗糙度 RMS 值分别为 1.04 和 0.355nm.器件片和热氧化

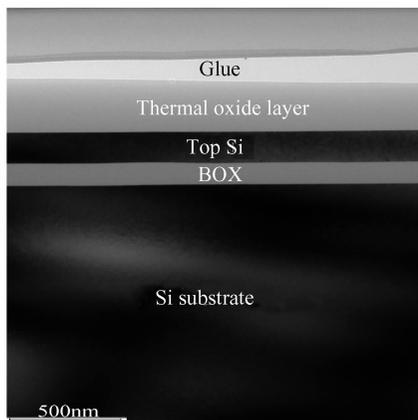


图 2 低剂量 SIMOX 材料 XTEM 照片

Fig.2 Cross-sectional TEM image of low dose SIMOX material

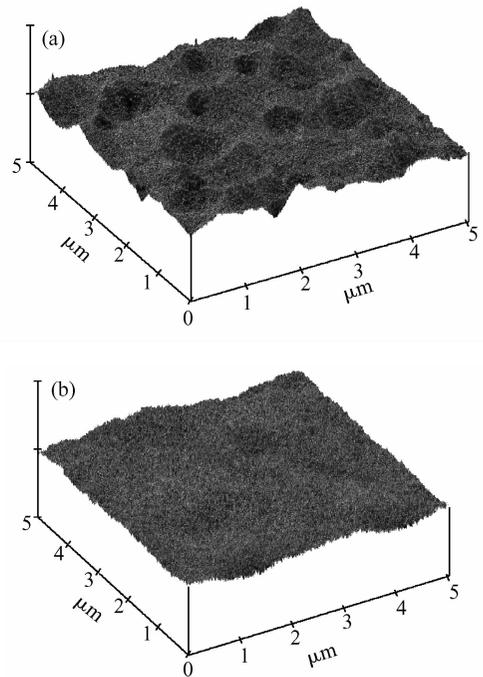


图 3 AFM 照片 (a) SIMOX 材料表面三维形貌;(b)SIMOX 材料顶层 SiO₂ 层表面三维形貌

Fig.3 Image of AFM (a) 3D surface morphology of SIMOX material;(b) 3D surface morphology of superficial SiO₂ layer of SIMOX material

后的支撑片(热氧化 SiO₂ 层的厚度为 600nm),经过表面活化处理,在键合机(EVG301)上键合.键合前,器件片和支撑片均需采用去离子水冲洗表面,以去除可能吸附在表面的颗粒并增加表面吸附的水分子,从而形成更多的氢键有利于键合.在移除挑针之后,器件片和支撑片接触在一起,为了防止界面间存在可能被包围的空气形成键合空洞,在硅片背面中心使用特富龙棒施加压力,使硅片间的键合从硅片中心迅速向四周扩展,同时排除掉界面间可能包围的空气,实现完全键合,键合界面无空洞存在.

但是文献[4]中的研究表明 SIMOX 材料埋氧层中电荷和 SOI/埋氧层的界面电荷产生的氧化电荷效应会对 SIMOX 材料和硅片的键合产生影响,严重的情况下 SIMOX 材料和硅片间将无法键合.而在本实验中并没有发现这一现象,经分析确定,其重要原因在于过去的十几年中 SIMOX 技术从全剂量注入发展到了低剂量注入,材料的质量得到了极大的改善,减少了界面电荷和埋氧层中电荷的数目,采用膜 MOS 的办法测定本实验中使用的低剂量 SIMOX 材料界面电荷密度为 $2\times 10^{10}\text{cm}^{-2}$,而文献[4]中全剂量 SIMOX 材料界面电荷密度高达 $8.49\times 10^{11}\text{cm}^{-2}$,界面电荷密度的减小使得其对键合的影响得以降低.此外,与一般的低剂量 SIMOX 材料相比,SIMOX 材料表面热氧化 SiO₂ 层极佳的表面粗糙度增强了器件片的可键合性,降低了键合的难度.

室温下键合好的键合片在 1100℃湿氧气氛下加固 3h,研磨器件片,将背面的残余硅层厚度减薄至 $4\mu\text{m}$.采用 TMAH 溶液将残余硅层去除,由于 TMAH 溶液能

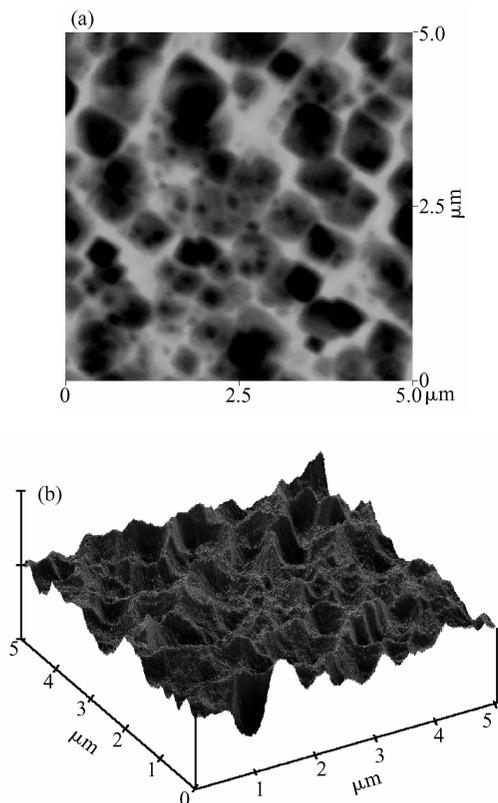


图 4 AFM 照片 (a) 初始 SOI 材料表面二维形貌; (b) 初始 SOI 材料表面三维形貌

Fig. 4 Images of AFM (a) 2D surface morphology of starting SOI material; (b) 3D surface morphology of starting SOI material

够腐蚀 Si 而对 SiO_2 没有影响, 因此 SIMOX 材料埋氧层的存在, 阻挡了 TMAH 溶液对器件片顶层硅的腐蚀. Tong 等人^[4]研究结果也表明埋氧层中存在的针孔或者缺陷并不影响埋氧层阻挡 TMAH 溶液的腐蚀, TMAH 溶液在 SIMOX 埋氧层实现自停止. 随后利用 HF 溶液去除该腐蚀截止层, HF 溶液在最终的 SOI 层自停止, 实现了顶层硅转移, 制备出初始薄膜厚埋层 SOI 材料.

3.3 薄膜厚埋层 SOI 材料的表征

制备出的初始薄膜厚埋层 SOI 材料, 埋层厚度为 $1\mu\text{m}$, 顶层硅厚度为 170nm . 此时 SOI 材料顶层硅表面形貌较差, 如图 4 所示, 为初始薄膜厚埋层 SOI 材料的 AFM 照片, 扫描范围 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$, 表面粗糙度 rms 值为 2.383nm . 如图中所示, 在初始薄膜厚埋层 SOI 材料表面分布有截面呈较为规则四边形的微小凹陷. 这是由于在 SIMOX 材料高温退火过程中埋氧层形成的早期, 氧化物沉淀的聚集是埋氧层形成的主要机制, 由氧化物沉淀聚集而成的埋氧层上表面(位于 SOI 层与埋氧层界面)形成一些截面呈四边形, 类马赛克形的突起^[5], 如图 5 所示. 这些突起深入进了 SIMOX 材料的 SOI 层中, 而注氧键合技术所制备的 SOI 材料上表面是 SIMOX 材料 SOI 层和埋氧层的界面, 在 HF 溶液去除 SIMOX 材料埋氧层后, 初始薄膜厚埋层 SOI 材料表面形成了截面呈较为规则四边形的微小凹陷. Ishiyama 等人^[5]的研究

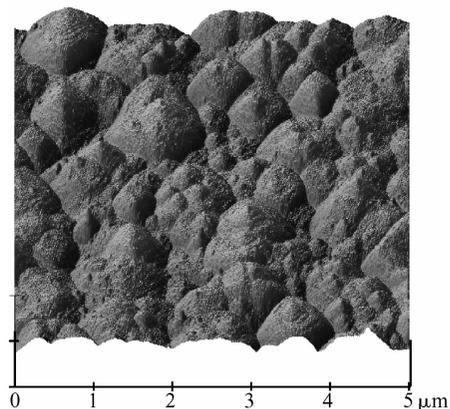


图 5 SIMOX 材料埋氧层上表面 AFM 照片

Fig. 5 AFM image of the upper surface of the SIMOX BOX

结果表明, 足够长时间的內热氧化 (ITOX) 退火过程能使 SIMOX 材料的埋氧层上表面平坦化, 因此, ITOX 过程能够间接改善初始薄膜厚埋层 SOI 材料的表面粗糙度, 并且减小表面微小凹陷的深度. 此外, 由于在 SIMOX 材料的 SOI 层和埋氧层界面附近存在一个富含氧的 SiO_x 过渡区域, 在 HF 溶液去除该埋氧层的过程中, HF 溶液将会对界面附近不同化学计量的 SiO_x 区域产生非均匀腐蚀. 因此不能完全排除 HF 溶液的非均匀腐蚀在初始薄膜厚埋层 SOI 材料表面形貌形成过程中所起到的作用, 但该作用主要是加大了微小凹陷的深度和使得微小凹陷的表面形貌更加不规则. 图 6 为所制备出的薄膜厚埋层 SOI 材料的 XTEM 照片, 从上到下依次为 SOI 层、埋氧层、支撑衬底. 从图中可见, 埋氧层质量良好, 无硅岛存在, 顶层硅与埋氧层之间的界面陡峭、清晰、平直, 埋氧层和顶层硅的厚度均匀. 图 7 为 SOI 材料的顶层硅和埋氧层界面的 HR-TEM 照片, 结果表明该 SOI 材料埋氧层和顶层硅之间具有原子级陡峭的分界面. 并且, 该 SOI 材料埋氧层由热氧化 SiO_2 组成, C-V 测试结果表明埋氧层击穿电压大于 $8\text{MV}/\text{cm}$, 显示其具有良好的绝缘特性.

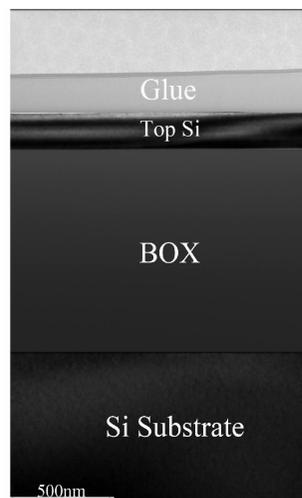


图 6 薄膜厚埋层 SOI 材料的 XTEM 照片

Fig. 6 XTEM image of thin film/thick BOX SOI material

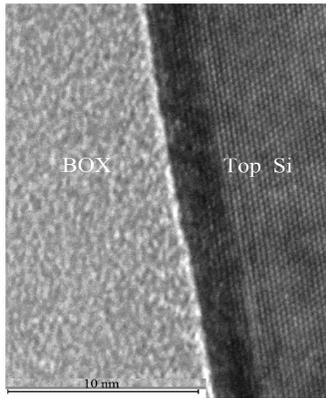


图7 顶层硅/埋氧层界面 HR-TEM 照片

Fig.7 HR-TEM of SOI/BOX interfacial region

制备出初始薄膜厚埋层 SOI 材料后,使用 CMP 法进行抛光.由于 SIMOX 材料 SOI 层与埋氧层界面附近存在大量未穿透 SOI 层的缺陷^[6],在 SOI 层转移之后,该缺陷集中层位于初始薄膜厚埋层 SOI 材料表面附近,经过 CMP 抛光后,该缺陷集中层被去除,同时其表面粗糙度也得到了改善,表面粗糙度 rms 值降低到 0.124nm.抛光后经椭圆偏振光谱仪(KLA-Tencor UV1280SE)取样 49 点进行测量,该薄膜厚埋层 SOI 材料顶层硅厚度 130nm,埋氧层厚度 1 μ m,厚度均匀性 $\pm 2\%$.目前,一般商用 SOI 材料顶层硅厚度均匀性在 $\pm 5\%$ 之内,表面粗糙度在 0.2nm 左右,因此采用注氧键合技术制备的 SOI 材料能够满足现代微电子技术的要求.

4 结论

采用注氧键合技术制备出的薄膜厚埋层 SOI 材料,

顶层硅厚度 130nm,埋氧层厚度 1 μ m,顶层硅厚度均匀性 $\pm 2\%$,这表明 SIMOX 材料顶层硅通过键合技术转移后仍能够保持其厚度均匀性.XTEM 结果表明,顶层硅与埋氧层之间的界面陡峭、清晰、平直,埋氧层和顶层硅的厚度均匀.HR-TEM 测试结果进一步表明埋氧层和顶层硅之间具有原子级陡峭的分界面.C-V 测试结果表明该 SOI 材料埋氧层击穿电压大于 8MV/cm,显示其具有良好的绝缘特性.以上结果表明,注氧键合技术成功结合了 SIMOX 技术和键合减薄技术的优点,制备的薄膜厚埋层 SOI 材料具有优异的顶层硅厚度均匀性和埋氧层绝缘特性,能够满足现代微电子技术的要求.因此,注氧键合技术将会是一项极具竞争力的 SOI 制备技术,具有广阔的应用前景.

参考文献

- [1] Colinge J P. Silicon-on-insulator technology: materials to VLSI. 3rd ed. Kluwer Academic Publisher, 2004
- [2] Mumola P B, Gardopce G J, Claps P J, et al. Plasma thinned SOI bonded wafers. Proceedings 1992 IEEE International Conference, 1992:152
- [3] Chen Meng, Wang Xiang, Chen Jing, et al. Dose-energy match for the formation of high-integrity buried oxide layers in low-dose separation-by-implantation-of-oxygen materials. Appl Phys Lett, 2002, 80:880
- [4] Tong Q Y, Gösele U. Fabrication of ultrathin SOI by SIMOX wafer bonding. J Electron Mater, 1993, 22:763
- [5] Ishiyama T, Omura Y. Analysis of interface microstructure evolution in separation by implanted oxygen (SIMOX) wafers. Jpn J Appl Phys, 2000, 39:4653
- [6] Ogura A, Tatsumi T, Hamajima T, et al. Evaluation of depth profile of defects in ultrathin Si film on buried SiO₂ formed by implanted oxygen. Appl Phys Lett, 1996, 69:1367

New Technology for Fabricating a Thin Film/Thick BOX Silicon-on-Insulator*

Wei Xing^{1,2,3,†}, Wang Xiang³, Chen Meng³, Chen Jing¹, Zhang Miao^{1,3}, Wang Xi^{1,3}, and Lin Chenglu³

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

(2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(3 Shanghai Simgui Technology Company Limited, Shanghai 201821, China)

Abstract: On the basis of combining the advantages of low dose separation by implanted oxygen (SIMOX) technology and bonding technology, a new technology named SIMOX wafer bonding (SWB) for fabricating a thin film (thin top silicon layer)/thick buried oxide (BOX) SOI was investigated. A thin film/thick BOX SOI with SOI layer thickness of 130nm, BOX thickness of 1 μ m, and SOI layer thickness uniformity of $\pm 2\%$ was fabricated with SWB technology. The surface morphology and structure of the thin film/thick BOX SOI were characterized using cross-sectional transmission electron microscopy (XTEM) and atomic force microscopy (AFM), respectively. The results suggest that the SOI layer of SWB can maintain the thickness uniformity of SIMOX and SWB SOI have an atomic scale SOI layer/BOX interface. Therefore, SWB is a promising technology for fabricating SOI material.

Key words: thin film/thick BOX SOI; SIMOX wafer bonding technology; XTEM

PACC: 0779; 7340T; 7360F

Article ID: 0253-4177(2008)07-1350-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60476006)

† Corresponding author. Email: xwei@mail.sim.ac.cn

Received 4 January 2008, revised manuscript received 9 February 2008