

doi:10.3969/j.issn.1001-2400.2012.03.034

## 机械致单轴应变 SOI 晶圆的制备

戴显英, 王琳, 杨程, 郑若川, 张鹤鸣, 郝跃

(西安电子科技大学 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 提出了一种晶圆级单轴应变绝缘层上硅(SOI)的新方法,并阐述了其工艺原理.将直径为100 mm(4英寸)的SOI晶圆片在曲率半径为0.75 m的弧形弯曲台上进行机械弯曲,弯曲状态下的SOI晶圆片在250℃下进行了20 h的热退火处理.对弯曲退火后SOI晶圆片进行了拉曼光谱表征,其拉曼频移为 $520.3\text{ cm}^{-1}$ ,小于体硅的典型值,拉曼频移差达到 $-0.3\text{ cm}^{-1}$ ,说明弯曲退火后的SOI晶圆片发生了单轴张应变.相应的应变变量计算为0.077%,高于文献报道的0.059%.

**关键词:** 绝缘层上硅;单轴应变;机械弯曲;弹塑性力学

**中图分类号:** TN304 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2012)03-0209-04

## Fabrication of the uniaxial strained SOI wafer by mechanical bending

DAI Xianying, WANG Lin, YANG Cheng,  
ZHENG Ruochuan, ZHANG Heming, HAO Yue

(Ministry of Education Key Lab. of Wide Band-Gap Semiconductor Materials and  
Devices, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Based on the theory of elasticity and the mechanical properties of SOI, this paper puts forward a new method to produce the uniaxially strained SOI wafer, and describes the principle of the process. The 4-in. Silicon-On-Insulator wafer under goes the mechanical-bended test on the pedestal whose curvature radius is 0.75m, and then it is annealed at 250℃ for 20 hours to achieve the uniaxial strain. The IR-transmission-undiffracted-diffraction instrument and Raman spectrum instrument are used for study of the pre-bonding quality and strain degree. The frequency shift of the Raman spectrum is  $520.3\text{ cm}^{-1}$ . The Si peak of the strained Si layer is shifted by  $-0.3\text{ cm}^{-1}$  compared to the typical value. It is indicated that a compressive uniaxial strain can be obtained after bending and annealing. The comparative strain is 0.077%, higher than the value of 0.059% in the literature.

**Key Words:** SOI; uniaxial strain; mechanically bending; elastic-plastic mechanics

兼有绝缘层上硅(SOI)和应变硅优点的绝缘层上应变硅(SSOI)技术是一种很具创新和竞争力的新技术,将成为制造高速、低功耗集成电路的优选工艺<sup>[1-4]</sup>.研究表明<sup>[5]</sup>,基于SiGe虚衬底的双轴应变SOI不仅因SiGe虚衬底导致其散热性能差,而且其空穴迁移率的增强在高场下会严重退化.单轴应变SOI不仅迁移率提升较双轴高,而且高场下空穴迁移率的增强不会退化<sup>[6]</sup>.研究表明,应变变量即使低于0.05%的单轴应变硅都可以实现载流子迁移率15%的提升.

文献[7]报道了一种晶圆级制备单轴应变SOI的方法,该方法采用两片不同直径的Si,先分别进行氧化和注氢,再进行机械弯曲及热退火键合,最后通过智能剥离获得单轴应变SOI.该方法在制作过程中Si片易破碎,工艺较复杂,必须进行氧化、注氢、高温剥离等工艺,而且必须是两片不同直径的Si弯曲键合.若是两个相同直径的Si片,则不能获得单轴应变SOI.

收稿日期:2011-12-08

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(6139801-1)

作者简介:戴显英(1961-),男,教授,E-mail:xydai@xidian.edu.cn.

基于弹性力学理论和 SOI 各层材料的力学特性,笔者提出了一种新的晶圆级单轴应变 SOI 制作方法,即采用一片成品 SOI 晶圆,通过机械弯曲与退火两步工艺就可获得晶圆级单轴应变 SOI.该方法具有设备与工艺简单(只需一片 SOI)、不易破碎、成本低、应变量大等特点.

## 1 工艺原理

### 1.1 无机材料的弹塑性屈服强度极限

根据材料力学理论<sup>[8]</sup>,在一定条件下无机材料的应力和应变有着确定的关系,如图 1 所示.图 1 中的 OA 段为比例变形阶段,其形变是弹性形变,其应力应变之间的关系是线性的,可用胡克定律表示为<sup>[9]</sup>

$$\sigma = E\varepsilon$$

式中,  $E$  为杨氏模量,在弹性变形过程中,通常  $E$  为常数.

由图 1 可见, AB 段已经不能用线性关系来表示,但变形仍然是弹性的,因其距离很小,通常并不加以区分.那么  $O$  到  $B$  段如果逐渐卸去载荷,随着应力的减小,应变也渐渐消失,最终物体的变形得以弯曲恢复.称  $O$  到  $B$  段为弹性形变区.

当材料处于  $B$  点时,继续施加载荷,应力分布经过  $C$  点和  $D$  点到达  $E$  点,  $C$  点和  $D$  点称为材料的屈服强度上极限和屈服强度下极限.应力达到  $D$  点时,材料开始屈服.此段材料的应变曲线很明显是非线性的,如果逐渐卸去载荷,最终物体将不能恢复到最初的  $O$  状态,也即物体发生了不可恢复的形变,称  $BE$  段为塑性形变区.一般来说,屈服强度上极限受外界因素的影响较大.因此,在实际应用中一般都采用屈服强度下极限作为材料的屈服极限.

材料的屈服极限一般与其杨氏模量呈正相关的关系,而  $\text{Si}$  和  $\text{SiO}_2$  的杨氏模量分别为  $169\text{GPa}$  和  $72\text{GPa}$ <sup>[8]</sup>,所以  $\text{Si}$  的屈服极限要比  $\text{SiO}_2$  的高.

材料的屈服极限受各种因素制约,如施加载荷的时间、温度等<sup>[10]</sup>.

① 时间效应.根据材料变形的时间效应理论<sup>[10]</sup>,无机材料在塑性阶段某一时刻的力学行为不仅与当时的应力状态有关,而且与它达到这一状态的时间长短有关.在一定的温度条件下,保持应力不变,塑性材料的应变会随着时间的推进而逐渐变大,这种现象称为蠕变;另一方面,如果保持应力不变,塑性材料的应变会逐渐衰减,这种现象称为松弛.

② 温度效应.根据材料力学特性的温度效应理论<sup>[10]</sup>, $\text{Si}$  和  $\text{SiO}_2$  等无机材料的屈服极限随着温度的升高而降低.因此, $\text{Si}$  和  $\text{SiO}_2$  的塑性形变在高温下要比低温时更明显一些.为了获得持久显著的塑性形变,在施加载荷的同时,必须对 SOI 晶圆进行高温退火处理.

### 1.2 工艺原理

SOI 晶圆其顶层  $\text{Si}$  层面上方放置在弧形机械弯曲台上,通过圆柱形压杆进行机械弯曲.将弯曲状态下的 SOI 晶圆放置在退火炉中,进行高温热退火.

根据材料弹塑性力学原理,受弯曲形变热处理的作用,SOI 晶圆中性面上部的  $\text{SiO}_2$  层和顶层  $\text{Si}$  层将沿弯曲方向发生单轴拉伸形变,其晶格常数将变大,即发生所谓的单轴张应变,如图 2(b)所示.同时,在 SOI 晶圆内部储存了一定的弹性势能.当退火结束去除机械外力后,在此弹性势能作用下,SOI 晶圆会发生回弹,即由弯曲状态恢复到原态.

但复原的 SOI 晶圆中顶层  $\text{Si}$  层却保留了一定量的张应变.这是因为在弯曲热退火处理时,设定了合适的退火温度与时间,保证所施加的机械外力能超过  $\text{SiO}_2$  层的屈服强度,但小于  $\text{Si}$  衬底的屈服强度,会使  $\text{SiO}_2$  层发生塑性形变,而  $\text{Si}$  衬底始终是弹性形变的.塑性形变的  $\text{SiO}_2$  埋绝缘层在 SOI 晶圆回弹复原时不可能完全回弹,仍保持一定量的张应变.而顶层  $\text{Si}$  层受塑性形变  $\text{SiO}_2$  埋绝缘层的拉持作用,也不能完全回弹,最终形成单轴张应变 SOI 晶圆,如图 2(c)所示.

同理,若将 SOI 晶圆顶层  $\text{Si}$  层面向下放置在圆弧形台面上进行机械弯曲与热退火,由于顶层  $\text{Si}$  层处于

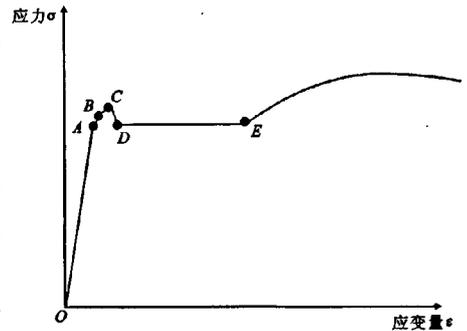


图 1 无机材料的应力与应变关系示意图

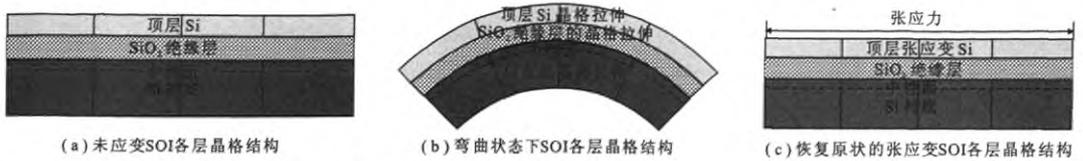


图2 机械致单轴张应变 SOI 工艺原理示意图

SOI 晶圆中性面的下部,在弯曲退火时,其晶格将被压缩,晶格常数变小,最终可得到单轴压应变 SOI 晶圆。

## 2 机械致单轴应变 SOI 工艺实验

实验采用了直径为 100 mm(4 英寸)n 型<100>SOI 晶圆,顶层 Si 厚度为 1000 nm、SiO<sub>2</sub> 埋绝缘层厚度为 300 nm、衬底 Si 厚度为 550 μm,采用 RCA 标准清洗 SOI 晶圆。

### 2.1 弯曲工艺

将 SOI 晶圆片放置在自制的弧形不锈钢机械弯曲台上,其<110>晶向与弯曲方向平行,如图 3(a)所示。两根圆柱形压杆随后分别水平放置在 SOI 晶圆片两端的边缘,如图 3(b)所示。缓慢旋转连接压杆的螺帽,使 SOI 晶圆片沿弧形台面逐渐弯曲,直至 SOI 晶圆片完全与弧形台面贴合,如图 3(c)所示。为了获得更大应变量的单轴应变 SOI 晶圆,实验选用的弯曲台曲率半径为 0.75 m。

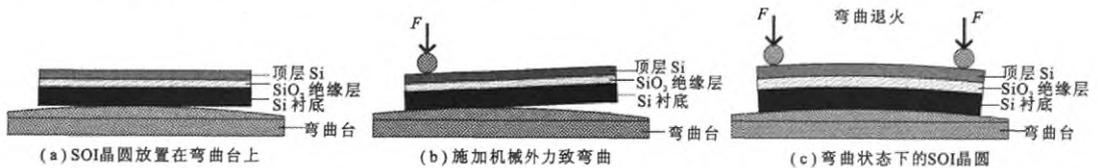


图3 单轴张应变 SOI 晶圆制作工艺流程图示意

### 2.2 退火工艺

根据文中的工艺原理,退火温度和退火时间应使得所施加的载荷高于 SiO<sub>2</sub> 埋绝缘层的屈服极限,但低于顶层 Si 的屈服极限。根据 Si 和 SiO<sub>2</sub> 的材料特性,选择退火温度为 250℃。

将载有 SOI 晶圆片的弧形不锈钢机械弯曲台放置在退火炉中,在 N<sub>2</sub> 气氛中进行退火,退火温度由室温 25℃缓慢升至 250℃,升温速率为 5℃/min,在 250℃保持 20 h。

### 2.3 样品卸架

退火结束后自然降温至室温,取出载有 SOI 晶圆片的弧形不锈钢机械弯曲台。旋转连接压杆的螺帽,将压杆缓慢提升,直至弯曲的 SOI 晶圆片回复原状。取下 SOI 晶圆片,置于干燥皿中。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 应力的拉曼光谱表征

采用拉曼光谱仪对单轴张应变 SOI 晶圆样品进行了应力表征,入射激光波长为 514.5 nm。弯曲前后的 SOI 晶圆拉曼频谱如图 4 所示。由图可见,弯曲前 SOI 晶圆的拉曼频移为 520.6 cm<sup>-1</sup>,这是典型的未应变体 Si 的标准拉曼峰值;弯曲后 SOI 晶圆的拉曼频移为 520.3 cm<sup>-1</sup>,与弯曲前的拉曼频移相差 0.3 cm<sup>-1</sup>。很明显,机械弯曲后的 SOI 晶圆片的拉曼特征峰向左移动。根据拉曼光谱原理<sup>[11]</sup>,说明弯曲后的 SOI 晶圆顶层 Si 的晶格变大了,即发生了所谓的张应变。

### 3.2 应变量的计算

根据 De Wolf 的理论<sup>[12]</sup>,单轴应变 SOI 的应力  $\sigma$  与拉曼频

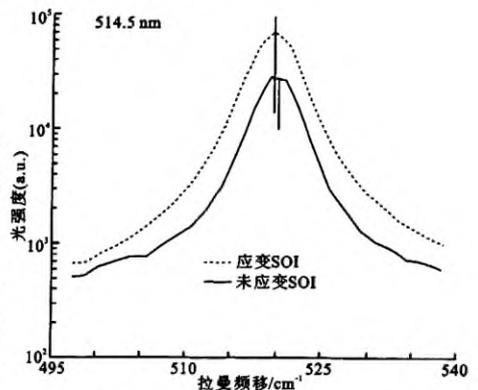


图4 SOI 晶圆片弯曲前后的拉曼频谱图

移差  $\Delta\omega$  的关系为

$$\sigma = -434 \Delta\omega, \quad (1)$$

式中,拉曼频移差  $\Delta\omega$  的单位是  $\text{cm}^{-1}$ ;应力  $\sigma$  的单位是 MPa.

$$\text{而应力 } \sigma \text{ 与应变 } \epsilon \text{ 之间的关系为}^{[9]} \quad \epsilon = \sigma/E, \quad (2)$$

式中,  $E$  是 Si 的杨氏模量,为 169 GPa. 故单轴应变 SOI 晶圆的应变变量可通过拉曼频移计算得到<sup>[13]</sup>,即

$$\epsilon = -0.256 \Delta\omega, \quad (3)$$

式中,  $\Delta\omega$  代表应变 SOI 的 Si 峰位置相对于未应变 SOI 中 Si 峰的频移,单位为  $\text{cm}^{-1}$ ;  $\epsilon$  是应变变量.

根据实验结果,通过式(3)计算得到单轴张应变 SOI 的应变变量  $\epsilon$  为 0.077%. 与文献[7]报道的相同弯曲半径下的 0.059%相比,文中的方法具有更大的应变效果.

## 4 结束语

提出了一种晶圆级单轴应变 SOI 晶圆的新方法. 根据 SOI 晶圆各层材料的力学特性和弹塑性力学理论,阐述了其工艺原理,并进行了晶圆级单轴张应变 SOI 晶圆的制备实验. SOI 晶圆样品的拉曼光谱表征结果和应变变量计算表明,文中的新技术不仅实现了 SOI 的晶圆级单轴应变,而且应变变量高于文献所报道的相似技术的结果.

致谢 感谢中国电子科技集团第 24 所的唐昭煊、中科院上海微系统所的王伟、西安电子科技大学的陈晓华、西安交通大学的李雁淮等为本论文的实验及撰写提供的真诚帮助和珍贵意见.

### 参考文献:

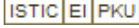
- [1] 宋建军, 张鹤鸣, 戴显英, 等. 第一性原理研究应变 Si/(111)Si<sub>(1-x)</sub>Ge<sub>x</sub> 能带结构[J]. 物理学报, 2008, 57(9): 5918-5922.  
Song Jianjun, Zhang Heming, Dai Xianying, et al. Band Structure of Strained Si/(111)Si<sub>(1-x)</sub>Ge<sub>x</sub>: a First Principles Investigation[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(9): 5918-5922.
- [2] 冯倩, 郝跃. 新型绝缘体上硅技术的发展与展望[J]. 西安电子科技大学学报, 2001, 28(6): 1-5.  
Feng Qian, Hao Yue. Development of SOI Technology on the New Insulator[J]. Journal of Xidian University, 2001, 28(6): 1-5.
- [3] 林成鲁, 张苗. SOI——二十一世纪的微电子技术[J]. 功能材料与器件学报, 1999, 5(1): 2-3.  
Lin Chenglu, Zhang Miao. SOI—the Microelectronics Technology in the 21<sup>st</sup> Century[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 1999, 5(1): 2-3.
- [4] Celler G K, Cristoloveanu S. Frontiers of Silicon-on-insulator[J]. Appl Phys, 2003, 93(9): 4955-4978.
- [5] Kim K, Chuang C T, Rim K. Performance Assessment of Scaled Strained-Si Channel-on-insulator (SSOI) CMOS[J]. Solid-State Electronics, 2004, 48(2): 239-243.
- [6] Haugerud B M, Bosworth L A, Belford R E. Mechanically Induced Strain Enhancement of Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors[J]. Applied Physics Letters, 2003, 94(6): 4102-4107.
- [7] Himcinschi C, Radu I, Muster F. Uniaxially Strained Silicon by Wafer Bonding and Layer Transfer[J]. Solid-state Electronics, 2007, 51(2): 226-230.
- [8] 李同林. 弹塑性力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2006: 43-96.
- [9] 张新占. 材料力学[M]. 2 版. 西安: 西北工业大学出版社, 2006: 4-6.
- [10] 秦世伦. 材料力学[M]. 成都: 四川大学出版社, 2008: 51-53.
- [11] 李碧波, 黄福敏. 用显微拉曼扫描成像法测集成电路中 CoSi<sub>2</sub> 电极引起的应力[J]. 半导体学报, 1998, 19(4): 299-303.  
Li Bibo, Huang Fumin. Stress Induced by CoSi<sub>2</sub> Grown on Polycrystalline Si Measured by Micro-Raman Spectroscopy [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 1998, 19(4): 299-303.
- [12] De Wolf I. Stress Induced by CoSi<sub>2</sub> Grown on Polycrystalline Si Measured by Micro Raman Spectroscopy[J]. J Raman Spectros, 1999(30): 877-883.
- [13] Himcinschi C, Reiche M, Scholz R, et al. Compressive Uniaxially Strained Silicon on Insulator by Prestrained Wafer Bonding and Layer Transfer[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(23): 1-3.

(编辑: 齐淑娟)

# 机械致单轴应变SOI晶圆的制备

作者: 戴显英, 王琳, 杨程, 郑若川, 张鹤鸣, 郝跃, DAI Xianying, WANG Lin, YANG Cheng, ZHENG Ruochuan, ZHANG Heming, HAO Yue

作者单位: 西安电子科技大学 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 陕西 西安, 710071

刊名: 西安电子科技大学学报 (自然科学版) 

英文刊名: Journal of Xidian University(Natural Science)

年, 卷(期): 2012, 39(3)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_xadzkjdx201203034.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_xadzkjdx201203034.aspx)