

智能剥离 SOI 高温压力传感器*

黄宜平 竺士炀 李爱珍 鲍敏杭 沈绍群 王瑾 吴东平

(复旦大学电子工程系, 上海 200433)

摘要: 采用改进的 RCA 清洗工艺提高了硅片的低温键合质量, 提出了一种积聚式缓慢退火剥离方法用于制备智能剥离 SOI (Silicon On Insulator) 材料, 并用该材料成功地研制了双岛-梁-膜结构的 SOI 高温压力传感器。对 SOI 压力传感器的测量结果表明, 当温度增加到 150℃ 左右时, 输出电压没有明显的变化, 其工作温度高于一般的体硅压力传感器 (其工作温度一般在 120℃ 以下)。测得所制备 SOI 压力传感器的灵敏度为 $63\text{mV}/(\text{MPa} \cdot 5\text{V})$, 比用相同版图设计和工艺参数制备的多晶硅压力传感器高约 7 倍多。

关键词: SOI; 压力传感器; 低温键合; 智能剥离; 高温

PACC: 0630N; 6855; 7280; 6170T

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)07-0924-05

1 引言

智能剥离(Smart-Cut) SOI(Silicon On Insulator) 技术^[1-3]是续 SIMOX(Separation by Implanted Oxygen) 和 BEZOI(Bonding and Etch-back SOI) 之后的一种新的 SOI 主流制备技术, 它结合了键合和离子注入的优点而克服了它们的不足, 是非常有前途的 SOI 制备技术。

所谓智能剥离, 是在一片硅片中注入中等剂量的氢离子, 然后同另一硅片低温键合, 经恰当的热处理, 键合对在氢离子注入的投影射程处裂开, 其中一片形成 SOI 结构。智能剥离 SOI 制备技术有很显著的特点和要求: (1) 对原始硅片的表面平整度和微观粗糙度的要求较高; (2) 由于注入的氢离子在约 300℃ 时就可能在硅片中形成微空腔层或使硅片表面出现气泡, 因此需要采用低温键合技术, 键合时的温度不能超过 300℃; (3) 由于在 400℃ 左右, 键合硅片就会部分剥离, 所以要在低温下($< 400^\circ\text{C}$) 增加键合强度。因此智能剥离 SOI 制备技术的关键在于高质量的低温键合以及采用合适的退火方法增加键合强度和顺利实现“智能剥离”。本文比较分析了不同

的退火工艺对剥离形成的 SOI 材料上层硅膜质量的影响, 采用改进键合前的硅片清洗工艺提高了键合质量, 并首次提出了积聚式缓慢退火的剥离方法, 在较低的温度(390°C) 下实现了均匀的智能剥离, 获得了具有较好质量的 75mm SOI 材料。

目前 SOI 材料主要应用于低压、低功耗超大规模集成电路和抗辐照、耐高温的特种集成电路。SOI 材料的另一个重要应用领域是制备微电子机械器件, 相比传统的体硅压力传感器, 用 SOI 材料制备的压力传感器同样具有耐高温的优点, 这是因为传统的体硅压力传感器是 pn 结隔离, 当温度升高至 100℃ 以上时, 由于硅的杂质能级向本征能级靠拢, pn 结漏电流很大, 而使器件无法工作。为了提高传感器的工作温度, 力敏电阻可用生长在氧化层上的多晶硅构成, 因为是介质隔离, 所以多晶硅压力传感器的工作温度可以得到提高^[4]。然而, 因为力敏电阻不象体硅压力传感器由单晶构成, 因此, 多晶硅压力传感器的灵敏度较低。用 SOI 材料制备的压力传感器国内外已有一些报道, 所用的 SOI 材料有 SIMOX^[5]、BEZOI^[6] 和 FIPOS (Full Isolation by Porous Oxide Silicon)^[7] 等。本文采用智能剥离 SOI 材料成功地研制了高温压力传感器, 用于制备压力

* 上海市科学技术发展基金(编号: 98JC14004) 和国家自然科学基金(批准号: 69876007) 资助项目。

黄宜平 男, 1946 年出生, 教授, 博士生导师, 从事半导体器件和集成电路工艺研究。

2000-08-24 收到, 2000-12-30 定稿

©2001 中国电子学会

传感器的智能剥离 SOI 材料可以不经最后的化学机械抛光, 降低了材料成本。本文研制的 SOI 压力传感器的力敏电阻由 SOI 单晶硅膜构成, 其灵敏度和体硅压力传感器相当, 要大于多晶硅压力传感器, 而且由于 SOI 压力传感器是介质隔离, 它的工作温度要大于传统的体硅压力传感器。

2 实验

所用硅片为 75mm, N 型(100)晶向的抛光片, 电阻率为 $5\text{--}8\Omega \cdot \text{cm}$, 硅片的总厚度变化(TTV)在 $2\mu\text{m}$ 以内。硅片经清洗后, 热氧化生长 240 或 500nm 厚的 SiO_2 层, 对有 240nm 厚 SiO_2 的硅片进行氢离子注入, 注入剂量为 $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, 能量为 70keV, 垂直投影射程约 600nm。对注氢硅片和有 500nm 厚 SiO_2 的支撑硅片进行改进的 RCA 清洗和活化处理。在常规的 RCA 清洗中, $\text{NH}_4\text{OH}\text{-H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$ 通常是第一步清洗液, 用于去除粒子、有机物和金属杂质, 常称为 SC-1 清洗液。据报道^[8], 在 $\text{NH}_4\text{OH}\text{-H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O} = 1:1:5$ 溶液中 70°C 时清洗 10—15min 会造成硅片表面较大的粗糙度。本文在改进 RCA 清洗工艺中, 适当地减少了 NH_4OH 的比例, 以减少其对硅片表面质量的影响。上述样品经清洗和活化处理后, 在自制的微洁净室中进行键合^[3]。键合后在 180°C 的烘箱中退火 100h 以上, 以增加键合能。用自制的红外透射成像系统对键合片的键合质量进行实时观测。然后分别采用不同的退火方法进行剥离, 其中一片形成 SOI 结构, 另一片是已经被剥离的注氢硅片, 经抛光后可再次使用。SOI 片在 1000°C 的氮气气氛中退火 1h, 以进一步增加键合强度, 并恢复上层硅单晶性。用魔镜观测转移形成的 SOI 片表面的质量。

实验中分别用 3 种方法进行退火剥离:(1) 快速热退火(RTA)剥离方法;(2) 常规的退火炉退火剥离方法;(3) 积聚式缓慢退火剥离方法。积聚式缓慢退火剥离方法为本文首次提出, 成功地在 390°C 实现了智能剥离。其原理是通过在较低温度下对键合片进行退火, 注入的氢在投影射程处聚合逐渐形成空腔层。当退火温度逐渐缓慢上升到 390°C 左右时, 此时由于空腔层内气体的压强没有达到瞬时剥离所需的临界压强, 听不到硅片裂开的声音, 硅片此时也没有剥离开。经过一段时间以后, 各个空腔层逐渐缓慢地连通在一起, 使空腔层缓慢地扩展到整个硅片,

从而使键合片在空腔层的形成处自动缓慢地剥离开。

对形成的 SOI 硅片进行背部减薄抛光, 得到总厚度为 240μm 双面抛光的 SOI 材料。SOI 压力传感器采用双岛-梁-膜结构设计^[9], 其总体结构示意图如图 1 所示。这种结构具有灵敏度高, 非线性小的特点。

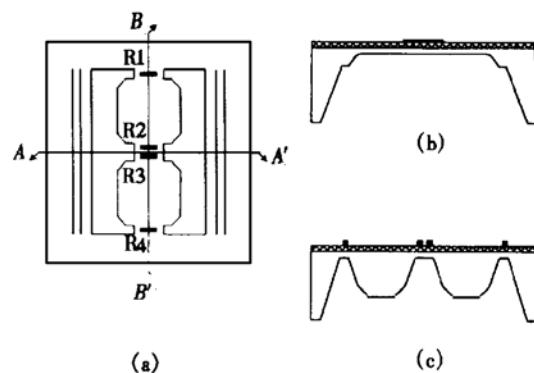


图 1 双岛-梁-膜结构压力传感器示意图 (a) 俯视图; (b) AA' 的截面图; (c) BB' 的截面图

FIG. 1 Schematic Views of Pressure Sensor with Double-Island-Beam-Membrane Structure (a) Top View; (b) Cross-Section of AA' ; (c) Cross-Section of BB'

双岛-梁-膜结构的背面有两个质量块, 一般称为“岛”, 起应力集中的作用。在硅片正面, 即 SOI 硅膜上制作四个力敏电阻。在背面两个岛对应的位置之间作两个电阻, 即图 1(a) 中的 R2 和 R3。在两个岛和边框之间对应位置各作一个电阻, 即图 1(a) 中的 R1 和 R4。四个电阻构成一个惠斯顿电桥。检测出电桥的输出电压变化就可以知道压力的变化。

从图 1(b)、(c) 压力传感器的截面图可看出在硅膜与边框或背岛的交界处形成有一定曲率半径圆角区, 使该区的应力极限下降, 可以大大提高硅膜区的抗过载强度。SOI 硅膜的厚度由氢离子注入的能量可控制在 600nm 左右, 这一厚度一方面可以满足制作力敏电阻的需要, 另一方面也使金属化布线的台阶高度不至于太高。采用硼扩散和双面对准技术在梁上形成四个电阻, 电阻值为 $9.2\text{--}9.5\text{k}\Omega$ 。利用 KOH 各向异性腐蚀液在 SOI 材料的背面形成双岛和膜。图 1(c) 中, 最上层四个突起的是 SOI 顶层硅形成的力敏电阻条, 其下面是 500nm 厚的氧化层。将 SOI 压力传感器芯片用静电键合的方法封装在管座上, 可进行灵敏度和高温特性等测试。

3 结果和讨论

图 2 是经改进的 RCA 清洗和活化后采用低温直接键合技术进行键合的键合片的红外透射图象。整个硅片键合比较完整,有几个小的杂质中心形成的未键合区域(气泡)。采用快速热退火方法进行退火剥离,当温度快速上升到 600℃左右时可以听到连续几次硅片裂开的声响。图 3 是剥离后得到的 SOI 片的表面魔镜图象,可以看出键合片从氢气注入形成的空腔层处分成几个区域剥离开,剥离的表面质量很差。

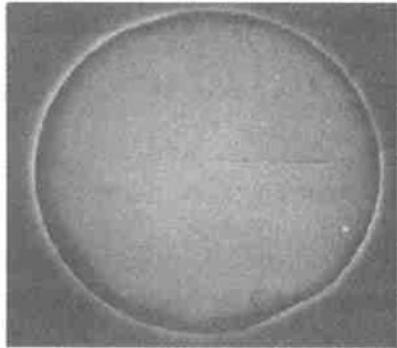


图 2 低温键合后键合片的红外透射图象

FIG. 2 Infrared Transmission Image of Bonded Wafer After Low Temperature Bonding

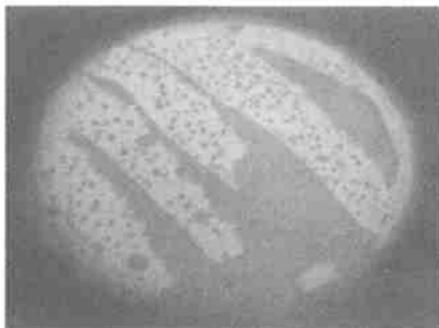


图 3 快速热退火处理方法剥离后表面的魔镜图象

FIG. 3 "Magic Mirror" Image of SOI Surface Cut by Rapid Thermal Annealing

图 4 是采用积聚式缓慢退火方法剥离后得到的 SOI 片的表面魔镜图象,最高退火温度为 390℃。可以看出键合片剥离后表面的魔镜图象和键合后的用红外透射系统观测到的图象基本相同,键合的质量基本决定了剥离后 SOI 片表面的质量,这表明用积聚式缓慢退火方法能够有效地进行退火剥离处理。



图 4 积聚式缓慢退火方法剥离后表面的魔镜图象

FIG. 4 "Magic Mirror" Image of SOI Surface Cut by Slow Annealing Process

文献上报道的剥离方法一般是把键合片放在退火炉中逐渐升温,达到 500℃左右键合片瞬时裂开^[10]。从本文的实验中看出,在较低的温度(390℃)经过一定的时间即可成功地实现智能剥离。这种剥离是一种积聚式的缓慢剥离,剥离的温度较文献上报导的剥离温度要低。由于氢离子注入时不可避免的能量歧离,使注入氢的分布较为分散,在较低温度下积聚式缓慢剥离能使氢的团聚更加合理,和瞬时剥离技术相比更容易获得平整光滑的顶层硅表面。

我们对 SOI 压力传感器进行了灵敏度、灵敏度温度系数和零点温度系数的测试。压力传感器的测试结果如表 1、2 所示。

作为例子,表 1 给出 1# 样品灵敏度特性的测量数据(10℃)。表 2 为当外加压强为 50kPa 时,传感器灵敏度的温度特性。

表 1 传感器灵敏度特性的测量数据(10℃)

Table 1 Measure Data of Pressure Sensor's Sensitivity at 10℃

P/kPa	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Output/mV	0	0.64	1.26	1.89	2.53	3.17	3.79	4.40	5.12

表 2 外加压强为 50kPa 时,传感器灵敏度的温度特性

Table 2 Temperature Properties of Pressure Sensor's Sensitivity at 50kPa

T/℃	62	74	88	98	102	118	130	140	144
Output/mV	2.94	2.87	2.83	2.75	2.68	2.65	2.63	2.58	2.59

由测试结果可知,SOI 压力传感器的灵敏度为 63mV/(MPa·5V)。灵敏度温度系数的计算公式为:

$$\frac{\Delta V_0}{\Delta T \times V_i} \times 100\%$$

其中 V_i 为常温下, 外加压强为测试时的压强的输出电压. 该 SOI 压力传感器的灵敏度温度系数为 $1.4 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$.

为了和多晶硅压力传感器进行比较, 我们采用同样的工艺步聚、参数以及版图用多晶硅材料制备了压力传感器, 并对得到的样品进行了测试. 图 5 给出了 SOI 压力传感器和多晶硅压力传器的输出电压与外加压强的变化曲线. 从图中可以看出多晶硅压力传感器的测试结果为: 灵敏度 $10\text{mV}/(\text{MPa} \cdot 5\text{V})$. SOI 压力传感器的灵敏度远大于多晶硅压力传感器的灵敏度.

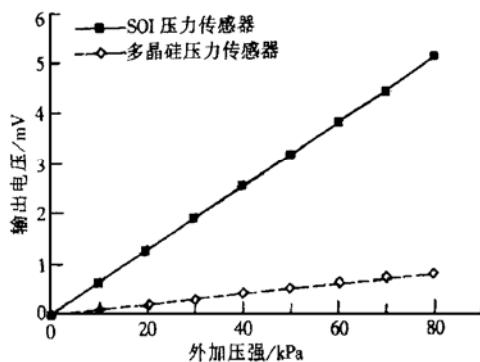


图 5 SOI 压力传感器和多晶硅压力传感器的测量结果比较

FIG. 5 Comparison of Measurement Results between SOI Pressure Sensor and Poly-Si Pressure Sensor

由于制作过程中的误差, SOI 压力传感器的膜区厚度和多晶硅压力传感器的膜区厚度的不同. 根据传感器灵敏度和器件膜的厚度成反比的原则, 可将两种传感器换算到同一厚度. 测量得到多晶硅压力传感器的膜厚为 $81\mu\text{m}$, SOI 压力传感器的膜最厚为 $96\mu\text{m}$. 我们把两种传感器的厚度都换算到 SOI 压力传感器的厚度. 换算后, 多晶硅传感器的灵敏度为 $7.3\text{mV}/(\text{MPa} \cdot 5\text{V})$. 因此 SOI 压力传感器的灵敏度比多晶硅压力传感器的灵敏度要大 7 倍多. 一般认为, 单晶硅的压阻系数比多晶硅高 3 倍, 而我们测量得到的 SOI 压力传感器的灵敏度比多晶硅的高 7 倍. 我们认为原因可能为: (1) 由于扩散误差造成 SOI 压力传感器的掺杂浓度比多晶硅的小, 实际测量的 SOI 电阻条的阻值确实比多晶硅的高; (2) 由于不可避免的光刻误差, 导致电阻条的位置偏差等.

由于我们在器件封装中连线的焊点只能承受 150°C 左右的高温, 本文的高温特性只测到 150°C 左右, 测试表明其输出电压没有明显变化. 由于 SOI 压力传感器采用完全的介质隔离, 没有 pn 结漏电的问题. 如果改进封装工艺, 并根据作者以前的报道^[8] 预期其能工作在 300°C 以上的高温.

4 结论

改进的 RCA 清洗工艺和积聚式缓慢地退火方法有效地提高了硅片键合与剥离的质量, 制备的智能剥离 SOI 材料可用于制备传感器器件.

采用双岛-梁-膜结构的压力传感器的设计, 用所制备的 SOI 材料研制成压力传感器, 其工作温度高于传统的体硅压力传感器的工作温度(120°C), 而其灵敏度为 $63\text{mV}/(\text{MPa} \cdot 5\text{V})$, 大大超过相应的多晶硅压力传感器.

参考文献

- [1] M. Bruel, Electron. Lett., 1995, **13**(14): 1201—1202.
- [2] ZHU Shiyang, ZHANG Miao, LIN Chenglu, HUANG Yiping, WU Dongping and LI Jinhua, Chinese Journal of Semiconductors, 1997, **18**(9): 705—709 (in Chinese) [竺士扬, 张苗, 林成鲁, 黄宜平, 吴东平, 李金华, 半导体学报, 1997, **18**(9): 705—709].
- [3] ZHU Shiyang, HUANG Yiping, LI Aizhan, WU Dongping, WANG Jin, RU Guoping and BAO Zongming, Chinese Journal of Semiconductors, 1999, **20**(12): 1071—1074 (in Chinese) [竺士扬, 黄宜平, 李爱珍, 吴东平, 王瑾, 茹国平, 包宗明, 半导体学报, 1999, **20**(12): 1071—1074].
- [4] Min-hang Bao, Micro Mechanical Transducers: Pressure Sensors, Accelerometers and Gyroscopes, Elsevier Publisher, 2000, Chapter 5.
- [5] B. Diem, P. Rey, S. Renard, S. V. Bosson, H. Bono, F. Michel, M. T. Delaye and G. Delapierre, Sensors and Actuators A-Physical, 1995, **46**(1—3): 8—16.
- [6] A. Merlos, J. Santander, M. D. Alvarez and F. Campabadal, J. Micromechanics and Microengineering, 2000, **10**(2): 204—208.
- [7] Ganming Zhao, Yiping Huang and Minhang Bao, Sensors and Actuators, 1990, **A21—A23**: 840—843.
- [8] C. Y. Chang and S. M. Sze, ULSI Technology, McGraw-Hill, 1996.
- [9] M. H. Bao, L. Z. Yu and Y. Wang, Sensors and Actuators, 1991, **A28**: 105—112.
- [10] M. Brnel, Jpn. J. Appl. Phys., 1997, **36**(38): 1636—1641.

High Temperature Pressure Sensor Fabricated with Smart-Cut SOI Materials^{*}

HUANG Yi-ping, ZHU Shi-yang, LI Ai-zhen, BAO Min-hang, SHEN Shao-qun,
WANG Jin and WU Dong-ping

(Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The quality of low temperature bonded silicon wafers has been improved by using a modified RCA cleaning process. A slow annealing process is used to split the bonded wafers in order to fabricate Smart-Cut SOI (Silicon On Insulator) materials. High temperature pressure sensor with a double islands-beam-membrane structure has been successfully fabricated with these SOI materials. The results of measurement on SOI pressure sensors reveal that the output voltage is not changed obviously at about 150°C. If the package process has been improved, the SOI pressure sensors are expected to work normally at 300°C, much higher than the bulk silicon pressure sensors (work temperature less than 120°C). The sensitivity of the SOI pressure sensor is about 63mV/ (MPa • 5V), about 7 times as much as that of the poly-Si pressure sensor that is fabricated with the same layout design and process parameters.

Key words: SOI; pressure sensor; low temperature bonding; Smart-Cut; high temperature

PACC: 0630N; 6855; 7280; 6170T

Article ID: 0253-4177(2001)07-0924-05

* Project Supported by Science and Technology Development Foundation of Shanghai Under Grant No. 98JC14004 and National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69876007.

HUANG Yi-ping male, was born in 1946, professor. He is engaged in the research on semiconductor device and IC technology.

Received 24 August 2000, revised manuscript received 30 December 2000

©2001 The Chinese Institute of Electronics