

## Monolithic Integration of Micro-Cantilever and Readout Circuits\*

TANG Ya-quan, ZHANG Hai-tao, MA Sheng-lin, YU Xiao-mei\*  
(Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** This paper presents a novel way of monolithically integrated micro-cantilever with read-out circuits by using both SOI CMOS and the SOI micromachining technologies. Based on a thorough investigation and an analysis of the worldwide research achievements on micro-cantilevers monolithic integration, an integrated sensor system composed of a cantilever array, a digital controlled multiplexer, and an instrumentation amplifier are designed and processed, and intermediate-CMOS process was designed to fabricate the integrated system. The measurement results on the SOI CMOS circuitry of the integrated system prove the feasibility of the integration design.

**Key words:** monolithic integration; MEMS; SOI; instrument amplifier  
**EEACC:** 7230; 7300

## 微悬臂梁传感器以及读出电路的单片集成\*

汤雅权, 张海涛, 马盛林, 于晓梅\*

(北京大学微电子学研究院, 北京 100871)

**摘要:** 提出了一种基于 SOI 技术的微悬臂梁传感器集成化方案, 并从传感器信号调理电路的设计和集成化工艺设计方面论证了该方案的可行性。微悬臂梁传感器集成化系统主要包括惠斯通电桥阵列以及微悬臂梁传感器的信号调理电路。信号调理电路部分包括温补电流源、时分多路选择器和两级仪用放大器。测量的结果证实了我们单片集成的可行性。

**关键词:** 单片集成; MEMS; SOI; 仪用放大器

**中图分类号:** TP212.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-1699(2008)04-0667-05

现阶段 MEMS 主要是作为传感器和微执行器应用。以前集成化的做法是信息的采集、信息的处理和信息的执行这三个单元分别制作, 然后在它们之间建立信息通道, 组成一个完整的系统。而现在的一个努力的方向是使信息的采集、处理和执行能够尽量在同一片芯片上实现, 能够用相同或相近的工艺同一次完成, 在一个芯片上实现一个完整的系统, 这就是所谓的单片集成。

这样做有一些明显的优点: (1) 能够使 MEMS 尽量与现有的 CMOS 工艺兼容, 从企业的角度可以降低成本, 减少新设备投资进而可以获取更大利润, 也利于企业参与到对 MEMS 发展与应用的推动; (2) 前面所述集成化拓展了 IC 的功能, 将 IC 从单纯的处理数据扩展到数据的收集、处理、执行合一, 对 MEMS

而言, 也扩展了 MEMS 的功能, 能够 MEMS 智能化, 不再单纯作为一个传感器或者执行器。我们按照制造 CMOS 与微结构制作的顺序来划分集成化的方案: Pre CMOS, Post CMOS 和 Intermediate CMOS。

本文采用 Intermediate - CMOS 集成化方法, 利用 SOI CMOS 的有源区的加工形成力敏电阻区、SOI PMOS 的源漏注入工序完成力敏电阻的图形定义并调整其阻值、SOI CMOS 的刻孔工序完成微悬臂梁的图形定义。在 SOI CMOS 的制备工序结束以后, 采用正面各向同性干法刻蚀技术 (ICP) 释放微悬臂梁。

### 1 微悬臂梁的设计

材料的电阻随应力而变化的现象称为压阻效

基金项目: 863 资助项目 (2006AA04Z336)

收稿日期: 2007-09-30 修改日期: 2008-02-20

应,半导体的压阻效应主要是由电阻率的变化所引起。掺杂单晶硅具有明显的压阻效应,其机械性能和其它电学性能也十分优良,是制作传感器的理想材料。

当施加力于悬臂梁时,产生的纵向应力和横向应力分别  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$ ,电阻的相对变化率可由下式给出:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_x \sigma_x + \pi_y \sigma_y \quad (1)$$

其中  $\pi_x$  是纵向压阻系数,  $\pi_y$  是横向压阻系数。对硅(100)晶面, Kanda<sup>[1]</sup>给出 P型硅片压阻系数比 N型高,且[110]晶向具有大的压阻系数。因此我们选择硼离子注入的 P型掺杂[110]晶向的 SOI 硅片作为单晶硅悬臂梁的压阻材料。设计中使电阻排列均取[110]晶向。图 1 为微悬臂梁的结构图,梁上电阻设计成 U型结构<sup>[2]</sup>。

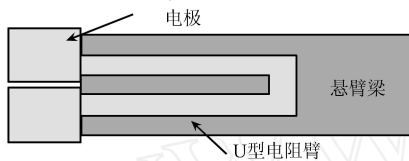


图 1 微悬臂梁结构示意图

表面应力与微悬臂梁位移的关系如下:

$$\sigma = \frac{3E(1-\nu/2)Fz}{2l^3} \quad (2)$$

其中  $\sigma$  和  $z$  分别代表应力与位移。采用 MEMS 专业软件 Intellisense 对矩形悬臂梁进行应力分析,模拟结果如图 2 所示(梁的左端为固支点)。模拟过程中,未考虑材料的本征应力,认为悬臂梁由均匀的氧化硅材料组成(最后生成的悬臂梁为多层结构,上表层和下表层的材料都是氧化硅,中间为单晶硅),均匀载荷力  $F$  加于悬臂梁的末端。由模拟结果看出,当力  $F$  作用在悬臂梁末端时,最大应力发生在悬臂梁支点附近,应力较大的区域约占悬臂梁总长度的二分之一。因此本文设计的力敏电阻的长度为悬臂梁长度的  $1/2 \sim 2/3$ 。电阻臂的长度为  $130 \mu\text{m}$ ,宽度为  $10 \mu\text{m}$ ,而悬臂梁的长度为  $200 \mu\text{m}$ ,宽度为  $50 \mu\text{m}$ 。

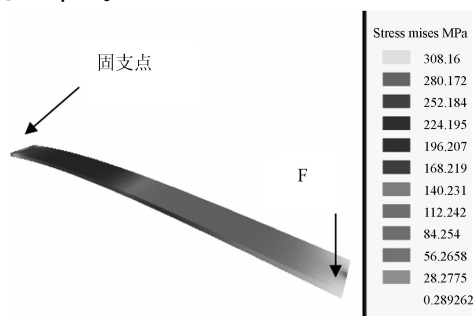


图 2 悬臂梁的应力分布的模拟结果

通过在悬臂梁的一个表面涂镀特殊的生化传感层,被测物质经扩散进入生化传感层,在悬臂梁表面发生物理吸附或者化学吸附并产生机械响应。悬臂梁纳米级的机械响应可以通过能量转换通过电学方式记录下来。

压阻效应经常用应变灵敏度系数  $K$  来表示,定义为:

$$K = \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta \epsilon} \quad (3)$$

其中  $\epsilon$  为介电常数。对单晶硅材料,  $K$  依赖于掺杂类型、掺杂浓度、晶向、温度、材料质量等。P型单晶硅的应变灵敏度系数比 N型单晶硅的应变灵敏度系数大,  $K$  值通常介于  $80 \sim 120$  之间,较大的应变灵敏度有利于信号调理电路的实现。

## 2 多路选择器与 IA 的实现

微悬臂梁传感器集成化系统主要包括阵列式惠斯通电桥传感以及微悬臂梁传感器的信号调理电路。信号调理电路部分包括温补电流源、时分多路选择器和两级仪用放大器。集成化系统的结构示意图如图 3 所示。

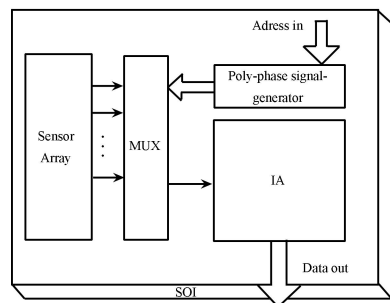


图 3 单片集成的结构示意图

图 4 所示的多通道选择器(MUX)可用来选择多路信号,通过输入地址信号,经过译码器译码,选通一条通道,传感信号输出到仪用放大器。通过这种工作方式,我们写入微传感器阵列的地址信息,实现了系统的“可编程”性,从而达到动态、实时地选择微传感器阵列中的传感器种类、数量以及读出次序的目的。

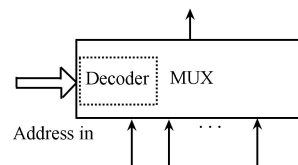


图 4 多通道选择器的示意图

本文采用传统的两级仪用放大器(Instrumentation Amplifier, IA)作为放大单元,该放大器有许多优点,如高输入阻抗、高共模抑制比、放大倍数简

单可调等<sup>[5]</sup>。如图 5 所示,仪用放大器可以划分为两级:第一级包括  $A_1$ 、 $A_2$  及其比例电阻  $R_1$ 、 $R_2$  和

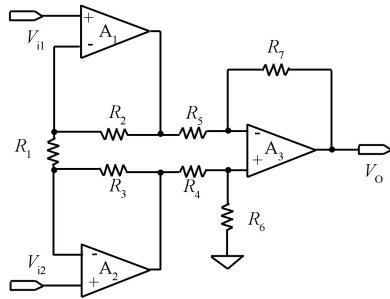


图 5 两级仪用放大器的电路结构图

$R_3$ , 第二级包括  $A_3$  及其比例电阻  $R_4$ 、 $R_5$ 、 $R_6$  和  $R_7$ 。 $A_1$  和  $A_2$  通过比例电阻构成各自的同相放大器,实现高输入阻抗和比例放大,并输出差分信号。 $A_3$  和四个反馈电阻组成一个差分放大器,实现共模抑制、低输出阻抗和单端输出,我们选择  $R_4 = R_5 = R_6 = R_7$ ,  $A_3$  不改变放大倍数。仪用放大器的传输函数如下:

$$v_o = (1 + \frac{2R_7}{R_1})(v_{i1} - v_{i2}) \quad (4)$$

式中  $v_{i1}$  和  $v_{i2}$  为差分输入电压,  $v_o$  为单端输入电压,  $R_2 \sim R_7$  电阻值均相等。通过改变  $R_1$  的阻值,可实现放大倍数的调整,设计中  $R_2 \sim R_7$  的阻值为 100 k。

### 3 集成化工艺流程

我们对集成化工艺流程进行了优化设计,使得制作集成传感器的掩模版数目(9 块)仅仅比制作 SOI CMOS 多了一块,用于定义微悬臂梁图形。具体的工艺步骤见图 6。

#### a 定义有源区

光刻第一块掩模版,定义有源区和力敏电阻、形成硅岛、去除氮化硅。

#### b 调整阈值电压

分别用第二、第三块掩模版,离子注入形成  $N^-$  区和  $P^-$  区,调整 SOI CMOS 阈值电压;同时也调整了力敏电阻区域的单晶硅电阻率。

#### c 多晶硅图形

光刻第四块掩模版定义多晶硅栅、多晶硅引线和多晶硅电阻,ICP 刻蚀多晶硅。

#### d 源/漏注入及体接触区注入

分别光刻第五块和第六块掩模版,对 NMOS 和 PMOS 的源漏区进行注入,同时对体接触区域进行注入,改善体接触电阻,快速热处理。

#### e 形成钝化层

淀积钝化层二氧化硅,致密退火。

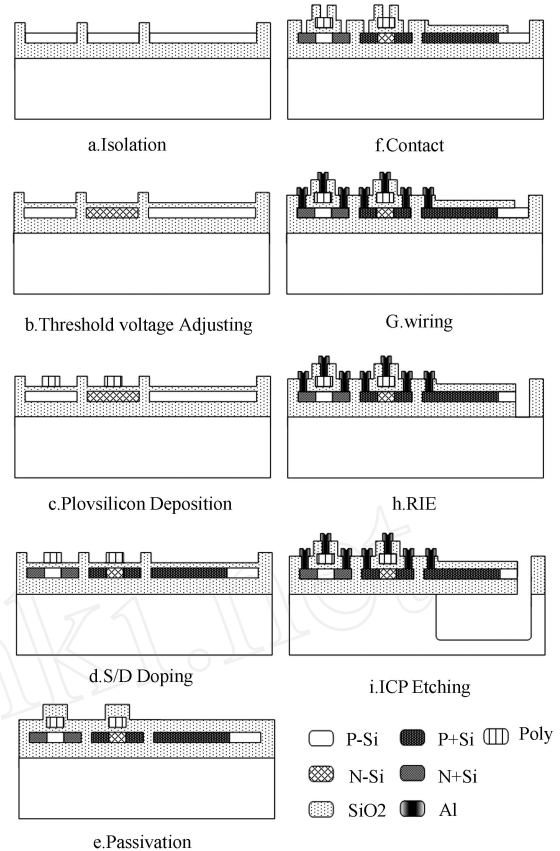


图 6 单片集成的工艺流程图

#### f 形成接触孔

光刻第七块掩模版,定义接触孔,同时定义微悬臂梁的图形和微槽。RIE 刻蚀钝化层,形成接触孔和微槽。

#### g 金属连线

溅射金属 Ti 和 Al。光刻第八块掩模版,定义金属引线,AME 刻蚀 Ti 和 Al,然后金属合金。

#### h RIE 刻蚀

光刻第九块掩模版,再一次确定微槽区域,RIE 刻蚀器件层和埋氧层。

#### i ICP 刻蚀以及悬臂梁的释放

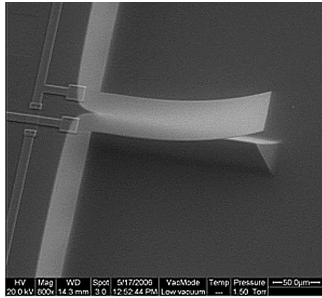
ICP 各向同性腐蚀微悬臂梁下的硅层,释放微悬臂梁。

### 4 仿真、测试与结果

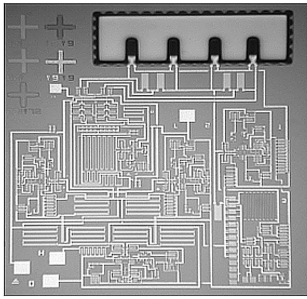
图 7 所示是释放后的微悬臂梁 SEM 照片以及与读出电路单片集成照片。

信号调理电路中的仪用放大器 (IA) 的仿真结果如图 8,实际应用时的外接电阻  $R_1$  分别选择 100 k 和 2 k, IA 的增益值符合理论值:

图 9(a)、(b)所示的是 PMOS/NMOS 器件的转移特性曲线,其中我们用 ISE 的工艺模拟结果指导了实际器件的加工流程,并且利用体接触设计成功

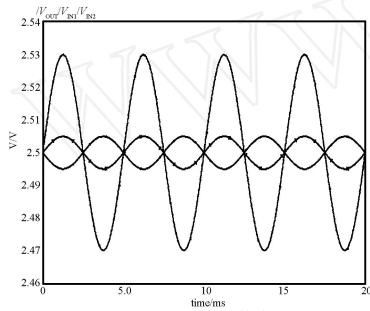


(a) 释放后的微悬臂梁

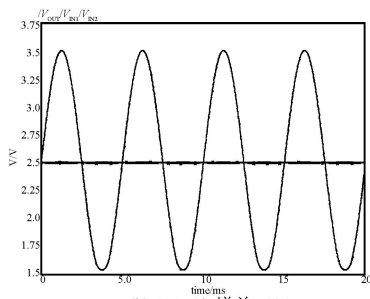


(b) 悬臂梁与读出电路的单片集成

图7 微悬臂梁 SEM 照片及单片集成照片



(a) R1=100k,增益=3



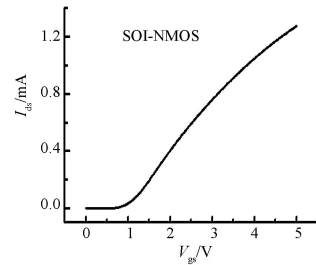
(b) R1=2k,增益=101

图8 仪用放大器放大特性的仿真结果

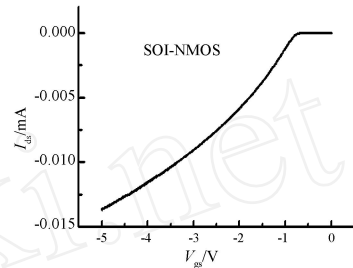
地消除了 SOI NMOS 的 Kink 效应。实际测量 SOI NMOS 器件的阈值电压值为 0.84V、SOI PMOS 器件的阈值电压为 -0.84 V,与设计值(±0.8 V)基本吻合。

图9(c)是 OTA 的闭环直流扫描曲线,OTA 的闭环直流扫描曲线显示,当 OTA 的输入电压信号从 -0.3 V 增大到 0.3 V 时,输出电压信号从 -1.25 V 增大到 1.1 V。计算可得 OTA 对直流信号的放大倍数为 4。图9(d)是两级仪用放大器的直流扫描曲线,当输入电压信号从 -2 V 增大到 6 V 时,输出电压信号从 -4.7 V 增大到 4.8 V。计算可得两级

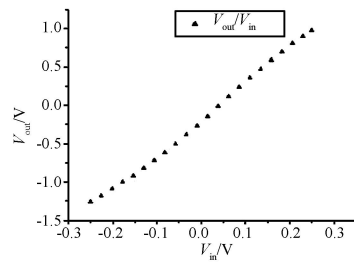
仪用放大器对直流信号的放大倍数为 20。本文设计  $R_1/R_7 = 0.1$ ,则两级仪用放大器的放大倍数为 21。由此可见,设计值与测量值基本吻合。



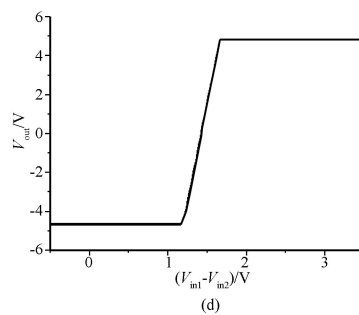
(a)



(b)



(c)



(d)

图9 一些测试结果

### 5 结论

压阻式微悬臂梁传感器与读出电路的集成可以提高传感器的性能、降低成本、实现微型化。基于体硅的微悬臂梁集成技术,受限于体硅 CMOS 的寄生效应和力敏电阻材料的单一性,很难实现高性能的压阻式微悬臂梁传感器。本文提出了一种基于 SOI CMOS 技术的集成化方案。当前的微悬臂梁传感器单片集成都是以体硅 CMOS 技术为研究基础,即在体硅硅片上实现微悬臂梁与 IC 的集成,或在 SOI 硅片的衬底上制备体硅 CMOS 电路进行集成。本

集成方案完全基于 SOI CMOS 技术,在 SOI 硅片的器件层上完成微悬臂梁传感器与 SOI CMOS 电路的单片集成。测试结果论证了我们集成化的可行性。

#### 参考文献:

- [1] Kanda, Y. IEEE Trans. Electron Devices[J]. 1982, ED-29, 64.
- [2] J. Bryzek, K. Petersen, and W. Mc Culley, Micromachines on the March[C]// NY, USA, IEEE Spectrum, No. 5, May 1994, 31:20-31.
- [3] Xiaomei Yu, Haitao Zhang, Xiuhan Li, Ting Li, and Dacheng Zhang, Design and Characterization of High-Sensitivity Cantilevers[C]// The 4th IEEE Conference on Sensors (IEEE Sensor 2005), Oct. 31st - Nov. 3rd, Orange County, Irvine, California, USA.
- [4] King Tsur-Jae, Howe R T, Sedlky S, Gang Liu, B. C.-Y, Wasilik M, Duenn C. Recent Progress in Modularly Integrated MEMS Technologies [C]// Electron Devices Meeting, San Francisco, CA, USA. 8-11 Dec. 2002.
- [5] A. J. Peyton and V. Walsh, "Analog Electronics with OP Amps", Cambridge University Press, 1993.
- [6] Kenneth R. Laker, Willy M. C. Sansen, Design of Analog Integrated Circuits and System[M]. McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [7] Maria Villarroja, Jaume Verd, Jordi Teva, et al, Sensor Based on Arrays of Sub-Micrometer Scale Resonant Silicon Cantilevers Integrated Monolithically with CMOS Circuitry [C]// Electron Devices, 2005 Spanish Conference on 2-4 Feb. 2005: 603-606.
- [8] J.-P. Colinge, SOI Devices and Circuits [C]// Serbia, Proc. 22nd Int. Conf. on Microelectronics, 2000, 2:407-414.



汤雅权(1984-),男,硕士研究生,研究方向为 MEMS 生化传感器及其与 CMOS 电路的集成技术, tangyaquan @ime.pku.edu.cn.



于晓梅(1961-),女,博士,北京大学微电子学研究院副教授,目前主要从事 MEMS 生化传感器及其与 CMOS 电路的集成技术研究, yuxm @ime.pku.edu.cn.