

MOS 环振式数字加速度传感器

张兆华 岳瑞峰 刘理天

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

摘要: 提出了一种新的环振式数字加速度传感器, 它采用做在硅梁上的 MOS 环形振荡器作为敏感元件, 两个反方向变化的环振输出信号通过集成在片内的混频器实现频率相减. 该传感器具有准数字输出、灵敏度高、温度系数低以及制作工艺简单等特点. 分析了环形振荡器的频率特性, 以及环形振荡器的谐振频率和加速度的关系, 分析并设计了加速度传感器的环形振荡器电路、混频器电路、物理结构以及制作工艺, 并制作了样品, 其灵敏度为 6.91kHz/g .

关键词: 数字式加速度传感器; 环形振荡器; 混频器

EEACC: 7230; 7320E; 1230B; 2570F

中图分类号: TP212; TN303

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)12-1318-06

1 前言

数字化是当今时代的一个特征, 加速度传感器数字化的实现是很多人的愿望. 随着研究工作的进展, 现在已经有很多方法可以实现这一目标, 但是, 一般都是采用片外集成的方式, 单片集成的数字式加速度传感器还是很难制作的.

几种常用的加速度计结构各有缺点, 实现数字化是比较困难和复杂的. 谐振式加速度计^[1]在原理上可以容易地实现数字化, 但是它的制作和封装非常困难, 需要精密的屏蔽设计, 以消除附加应力对谐振梁的影响. 压阻式加速度计^[2,3]的输出信号是模拟电压, 要实现数字化就需要有复杂的接口电路和后处理数字电路相连接. 另外, 压阻式加速度计的敏感元件是电阻, 存在温度漂移, 不可避免地需要解决复杂的温度补偿问题. 电容式加速度计^[4]的敏感元件是微小电容, 一般情况下很难制作高灵敏度传感器. 另外, 微小电容的检测也是很困难的, 需要非常复杂的匹配和处理电路.

我们研究工作的目标是设计一种制作简单、数字化程度高的加速度传感器. 为此, 我们提出了一种新的加速度传感器结构, 称之为环振式数字加速度传感器.

2 环振式数字加速度传感器的基本原理

2.1 MOS 晶体管的力敏效应

在应力作用下, 由于硅的压阻效应, MOS 晶体管源漏极之间的沟道电阻将发生变化, 这主要是因为沟道区载流子的迁移率随应力改变而变化^[5]. 载流子迁移率随应力的变化与载流子的类型以及晶向有关. 对于(100)晶面的 PMOS 晶体管, 如果应力的方向是沿 $\langle 110 \rangle$ 晶向, 那么源漏极平行于 $\langle 110 \rangle$ 晶向的 PMOS 晶体管(即源漏极之间的电流方向和 $\langle 110 \rangle$ 晶向平行), 其载流子迁移率随应力变大而变大; 源漏极垂直于 $\langle 110 \rangle$ 晶向的 PMOS 晶体管(即源漏极之间的电流方向和 $\langle 110 \rangle$ 晶向垂直), 其载流子迁移率随应力变大而减小, 如图 1 所示.

由于迁移率的变化, 使 MOS 晶体管的特性发生变化. 当在沟道区有应力 S 作用时, 其沟道电阻将随应力 S 改变而变化, 如图 1(a). 若把 MOS 晶体管放在硅悬臂梁结构的应力敏感区, 如图 1(b), 当质量块在加速度 a 作用下使硅梁发生弯曲形变时, 在硅梁根部产生应力 S , 从而使 MOS 晶体管的特性发生改变.

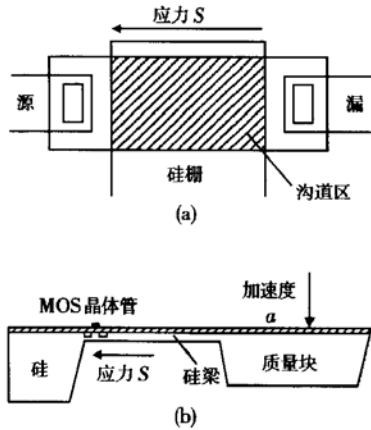


图 1 MOS 晶体管的力敏效应示意图 (a) 位于应力区的 MOS 晶体管; (b) 悬臂梁上的 MOS 晶体管

Fig. 1 Piezoresistive effects of MOS transistors
(a) MOS transistor located on stress sensitive areas;
(b) MOS transistor located on silicon beam

2.2 环振式数字加速度传感器的基本原理

环振式数字加速度传感器就是利用晶体管的压敏效应, 加速度使由晶体管组成的环形振荡器的谐振频率发生变化, 通过检测环形振荡器振荡频率的改变来检测加速度的大小。

环振式数字加速度传感器主要由环形振荡器、混频器和滤波器构成, 如图 2 所示。在图中, 有两个电学参数完全一致的环行振荡器, 它们分布在硅梁结构的应力敏感集中区, 一个环振的源漏极平行于应力方向(即源漏极之间的电流方向和应力方向平行), 称为纵向环形振荡器; 另一个环振的源漏极和应力方向垂直(即源漏极之间的电流方向和应力方向垂直), 称为横向环形振荡器。在图 2 中, 混频器做在非应力敏感的厚体硅上, 滤波器是片外集成的。

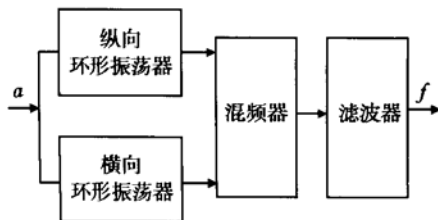


图 2 环振式加速度传感器原理框图

Fig. 2 Schematic diagram of ring oscillator accelerometer

当有加速度 a 作用时, 由于压敏效应, 分布在硅梁结构应力敏感区的两个环形振荡器的振荡频率发生变化, 纵向环形振荡器的振荡频率增加, 而横向环

形振荡器的振荡频率减小, 它们的输出频率通过混频器实现相减, 从混频器输出的频率信号通过一个低通滤波器, 消除高次谐波, 得到输出信号 f 。通过检测信号 f 的频率, 就可以得到加速度 a 的值。

这种加速度传感器的特点是采用环行振荡器作为敏感器件, 其输出信号是频率信号。加速度是一种模拟量, 频率信号是一种准数字量, 这样就实现了从模拟量向数字量的转化。和传统谐振式加速度计相比较, 环振式加速度传感器的优点是制作简单, 不需要精密的屏蔽设备。另外, 采用混频器作为片内信号处理器件, 既能减小温度对输出的影响, 又可以消除很大的共模基频信号, 便于后处理电路的直接应用。和传统的压阻式加速度计相比较, 环振式加速度传感器的优点是它的输出信号是频率信号, 数字化程度高。此外, 和传统的压阻式加速度计比较, 环振式加速度传感器的温度性能改进了很多。

3 环振式加速度传感器的设计

3.1 环形振荡器的设计与分析

环形振荡器由奇数个反相器首尾相连构成^[6], 如图 3 所示, 其振荡频率取决于反相器的延迟时间和反相器的级数, 它们之间的具体关系如下:

$$f = \frac{1}{2n\tau_{PD}} \quad (1)$$

其中 n 为反相器的级数; τ_{PD} 是反相器的延迟时间, 它可以表示为反相器上升时间 t_r 和下降时间 t_f 的函数。

$$\tau_{PD} = \frac{t_r + t_f}{2} \quad (2)$$

$$t_r = \frac{2C_L}{\mu C_{ox}} f_r(V) \quad (3)$$

$$t_f = \frac{2C_L}{\mu C_{ox}} f_f(V) \quad (4)$$

其中 C_L 为反相器的负载电容; C_{ox} 为反相器的栅电容; $f_r(V)$ 、 $f_f(V)$ 是和工作电压有关的函数。综合以上表达式, 环形振荡器的谐振频率可以表示为晶体管迁移率 μ 的函数:

$$f = \mu \frac{C_{ox}}{2nC_L} \times \frac{1}{f_r(V) + f_f(V)} \quad (5)$$

从以上分析可以看出, 环形振荡器的谐振频率和晶体管的迁移率成正比。而由晶体管的压敏效应我们知道, 晶体管的迁移率正比于晶体管所受到的

由加速度引起的应力, 所以, 通过检测环形振荡器谐振频率的变化, 就可以得到加速度的大小.

环行振荡器有多种电路形式, 最常见的有 NMOS、PMOS 和 CMOS 环振电路. 通过比较, 可以发现, NMOS 环行振荡器制作工艺最简单, 但是输出特性比较差, 存在阈值损失. CMOS 环行振荡器的特性最好, 但是制作工艺比较复杂. 所以本文采用 PMOS 环行振荡器. 用 PMOS 器件作为敏感元件, 是因为与 NMOS 器件相比, PMOS 器件的压敏系数大, 压敏效应更明显, 并且 PMOS 器件的温度系数小. 用 PMOS 工艺制作电路, 是因为和 CMOS 工艺相比, PMOS 工艺流程简单, 成品率高.

图 3 是用 SPICE 进行模拟优化得到的环行振荡器电路原理图, 该环振共有 11 级反相器, 后面是输出级. 该环振的输出波形为正弦波, 谐振频率为 $f_0 = 1.5\text{MHz}$, 输出信号的幅度为 2 V.

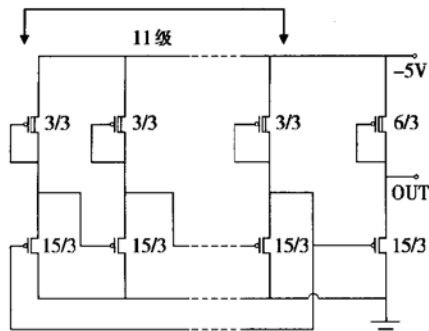


图 3 PMOS 环行振荡器电路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of PMOS ring oscillator

3.2 混频器的设计与分析

当有加速度作用时, 在同一个硅梁上的纵向环行振荡器和横向环行振荡器的谐振频率随加速度的变化是不一样的, 纵向环行振荡器的谐振频率 f_1 随加速度变大而变大:

$$f_1 = f_0 + \Delta f_1 + f_1(T) \quad (6)$$

横向环行振荡器的谐振频率 f_1 随加速度变大而变小:

$$f_1 = f_0 - \Delta f_1 + f_1(T) \quad (7)$$

其中 f_0 为环振本征频率; Δf_1 、 Δf_1 为加速度引起的频率变化; $f_1(T)$ 、 $f_1(T)$ 为环振频率随温度的变化函数.

由于两个环振的电学参数完全一样, 并且它们在硅片上分布在一起, 其温度影响也应该基本相同, 因此 $f_1(T) = f_1(T)$. 把这两个环振的振荡频率相

减, 可以得到两个环振的差频输出:

$$f = f_1 - f_1 = \Delta f_1 + \Delta f_1 \quad (8)$$

通过对环振频率信号的处理, 得到环振的差频输出. 这样不但可以减小温度对输出的影响, 而且增大了对加速度的输出响应频率, 另外, 还可以消除很大的共模基频信号, 便于后处理电路的直接应用. 在本设计中采用混频器来实现频率相减功能.

混频器有多种形式, 很多电路都可以实现混频作用, 比较典型的有电感电容耦合混频器. 在微电子领域, 很难做比较大的电感和电容, 一般不采用电感电容来实现混频. 根据晶体管的小信号特性, 单个晶体管就可以实现混频. 所以为了实现单片集成, 一般采用晶体管混频电路.

为了改善混频特性, 我们设计了一种双栅 MOS 混频器, 如图 4 所示. 在图中, -5V 是直流电源, 为混频器提供直流偏置, IN1、IN2 是两个频率输入信号, OUT 是输出信号. 用 SPICE 对双栅 MOS 混频器进行了仿真设计, 输入信号频率范围是 2MHz , 混频之后的输出信号范围是 $0 \sim 1\text{MHz}$, 该混频器的输出信号幅度为 0.5V . 三角波和方波的混频特性比较差, 这是因为这两种波形比较复杂, 无法等效成比较简单的正弦波. 因此, 为了得到比较好的混频特性, 环行振荡器的输出波形要求和正弦波比较相似.

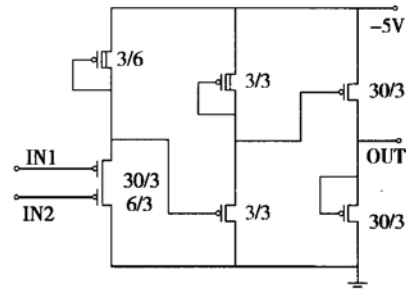


图 4 双栅 MOS 混频器电路原理图

Fig. 4 Schematic diagram of double-gate MOSFET mixer

3.3 加速度传感器的结构设计

压阻式加速度传感器一般都采用质量块和硅梁结构^[3]. 单梁和双梁虽然结构简单, 但是他们的横向灵敏度比较大. 另外八梁和六梁结构太复杂^[7], 不容易制作, 并且每个梁的应力也比较小. 通过比较各种硅梁结构的优缺点, 本设计采用四梁结构.

我们采用的硅梁结构如图 5 所示, 图 5(a) 为结构正视图, 图 5(b) 是剖面图. 在图中, O1、O2 是两个

电学参数完全相同的环形振荡器, M 是混频器, F 是外接的滤波器. 另外, a 是加速度, S 是由加速度产生的应力.

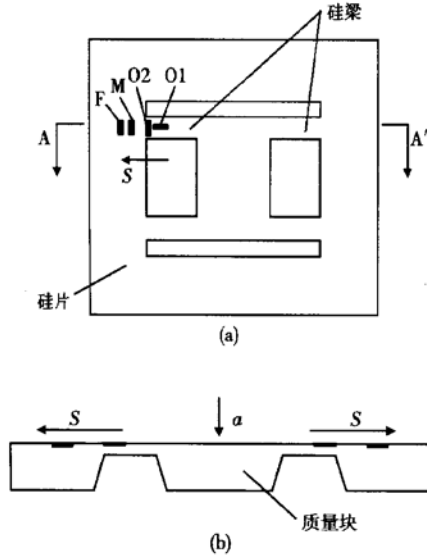


图 5 四硅梁加速度传感器结构示意图 (a) 正视图; (b) A-A' 剖面图

Fig. 5 Schematic diagram of the mechanical structure (a) Top view; (b) A-A' section view

利用有限元分析软件 ANSYS, 我们对该结构进行了应力分析, 确定了硅梁的结构尺寸, 长为 $2000\mu\text{m}$; 宽为 $400\mu\text{m}$; 厚为 $15\mu\text{m}$.

4 加速度传感器的制作工艺

图 6 是环振式数字加速度传感器的制作工艺流程图, 图中所示的剖面图和图 5(b) 中的 A-A' 剖面相对应. 主要制作步骤简述如下:

(1) 采用 (100) 晶向的双抛硅片作为衬底和结构材料. 首先双面生长氧化硅 300nm , 然后双面淀积氮化硅 200nm (图 6(a)), 氧化硅和氮化硅的作用是作体硅腐蚀时的掩蔽层, 保护硅片免受 KOH 的腐蚀;

(2) 光刻氮化硅窗口, 露出需要腐蚀的窗口, 利用 KOH 腐蚀形成硅梁结构, 硅梁的厚度约为 $100\mu\text{m}$ (图 6(b)), 我们采用的 KOH 溶液的浓度是 33% wt, 腐蚀温度为 80°C ;

(3) 采用典型的 EDMOS 工艺制作环形振荡器以及混频器 (图 6(c)), 其制作工艺包括 5 次光刻, 4 次离子注入, 3 次热氧, 采用 LPCVD 淀积氧化硅和氮化硅各一次, 最后溅射铝电极和铝引线;

(4) 利用各向异性体硅腐蚀减薄硅梁, 使其厚度达到 $15\mu\text{m}$, 并释放出硅梁结构 (图 6(d)).

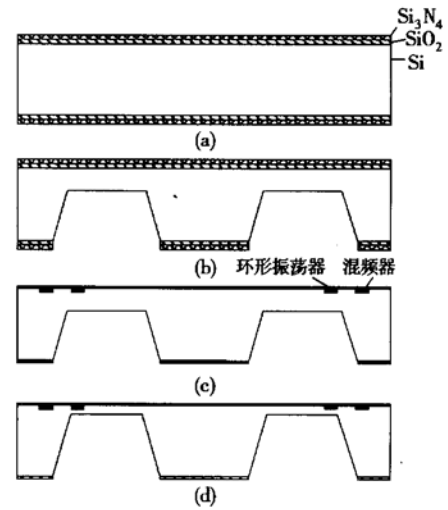


图 6 加速度传感器的主要制作工艺步骤

Fig. 6 Fabrication process steps of ring oscillator accelerometer

5 试验结果和讨论

图 7 给出了纵向环形振荡器的输出频率随加速度的变化曲线. 从图中可以看出, 纵向环形振荡器的振荡频率随加速度增大而变大, 其变化率约为 3.46kHz/g . 图 8 给出了纵向环形振荡器的输出频率随加速度的变化曲线, 从图中可以看出, 纵向环形振荡器的振荡频率随加速度增大而减小, 其变化率约为 -3.45kHz/g .

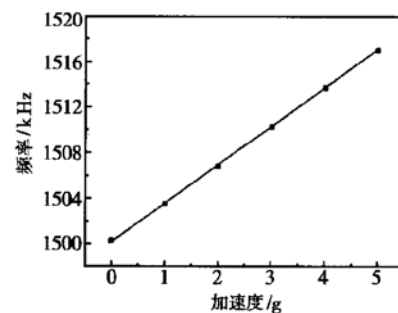


图 7 纵向环形振荡器的输出频率随加速度的变化曲线

Fig. 7 Frequency response of the longitudinal ring oscillator versus acceleration

图 9 给出了加速度传感器的输出频率和加速度的关系曲线, 滤波器是采用片外集成的方式, 该加速度传感器的零加速度频率输出是 350Hz , 灵敏度为

6.91kHz/g. 该器件的温度系数以及零点漂移等特性有待进一步测试.

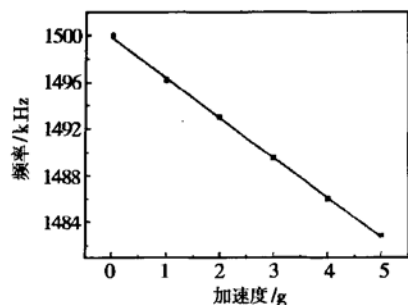


图8 横向环形振荡器的输出频率随加速度的变化曲线

Fig. 8 Frequency response of the transverse ring oscillator versus acceleration

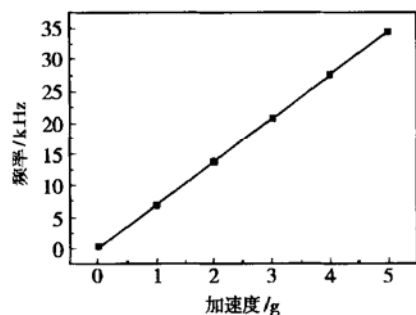


图9 环振式加速度传感器的频率输出

Fig. 9 Frequency response of the ring oscillator accelerometer versus acceleration

在传感器的制作过程中, 必须非常精确地控制硅梁的厚度, 这是因为硅梁的厚度对器件的性能和均匀性以及重复性有很大的影响. 为了达到精确控制硅梁厚度的目的, 在传感器的制作中, 我们分两步来制作硅梁结构, 首先预腐蚀硅片, 使硅梁厚度达到 $100\mu\text{m}$, 然后制作环形振荡器和混频器, 最后, 采用比较低的腐蚀速率来腐蚀硅片, 使硅梁的厚度达到 $15\mu\text{m}$.

6 结论

本文介绍了一种新型的环振式数字加速度传感器, 和传统的加速度传感器不同, 它采用环形振荡器作为敏感元件, 利用混频器作为片内的信号处理单元, 具有准数字输出和单片集成的特点, 而且制作工艺及测量方法比较简单. 这种加速度传感器具有较大的实用意义和广泛的应用前景.

参考文献

- [1] Burrer C, Esteve J, Tamayo E L, et al. Resonant silicon accelerometers in bulk micromachining technology-an approach. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1996, 5 (2): 122
- [2] Zhu Haijun, Chen Hong, Bao Minhang. Design and characterization of silicon lateral accelerometer. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1997, 18(7): 518 (in Chinese) [朱海军, 陈宏, 鲍敏杭. 横向加速度传感器设计及特性研究. *半导体学报*, 1997, 18(7): 518]
- [3] Takao H, Matsumoto T, Ishida M, et al. Stress-sensitive differential amplifiers using piezoresistive effects of MOSFETs and their application to three-axial accelerometers. *Sensors and Actuators A*, 1998, 65: 61
- [4] Boser B E, Howe R T. Surface micromachined accelerometers. *IEEE J Solid-State Circuits*, 1996, 31(3): 366
- [5] Canali C, Ferla G, Morten B, et al. Piezoresistivity effects in MOSFET useful for Pressure Transducers. *Journal of Physics D*, 1979, 12: 1973
- [6] Neumeister J, Schuster G, Münch W V. A silicon pressure sensor using MOS ring oscillators. *Sensors and Actuators*, 1985, 7: 167
- [7] Sim J H, Cho C S, Kim J S, et al. Eight-beam piezoresistive accelerometer fabricated by using a selective porous-silicon etching method. *Sensors and Actuators*, 1998, A66: 273

A Novel Digital Accelerometer Using MOS Ring Oscillators

Zhang Zhaohua, Yue Ruifeng and Liu Litian

(*Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: A novel digital accelerometer using ring oscillators (RO) and mixer is presented. It is different from piezoresistive or capacitive accelerometers that the sensitive unit of this novel accelerometer is MOS ring oscillators located on silicon beams. There are two different ring oscillators in this accelerometer. The output signal is achieved by subtracting the syntonetic frequency of one ring oscillator from that of another. The subtraction is realized by a mixer located on the bulk silicon. The accelerometer has many perfect characteristics such as high sensitivity, low temperature coefficient, and simple fabrication process. The best excellence is that digital signal can be achieved directly from the output signal of the RO accelerometer. The frequency characteristic of MOS ring oscillator and its relationship with acceleration are described. The circuits, physical structures and fabrication processes of RO accelerometer are designed. The sensitivity of fabricated device is 6.91kHz/g.

Key words: digital accelerometer; ring oscillator; mixer

EEACC: 7230; 7320E; 1230B; 2570F

Article ID: 0253-4177(2003)12-1318-06