

MEMS电容应变传感器

冯勇建

(厦门大学机电系 厦门 631005)

摘要: 本文详细介绍了一种用硅玻璃键合工艺制作的微型梁式电容应变传感器,通过 ANSYS 软件并结合 MEMS 器件的特点进行优化,设计并制作了由 MEMS 工艺实现的微型梁式电容应变传感器。为保证应变器件稳定工作,在测量电路中加一直流静电驱动电压在电容器的极板之间,以保证建立的电场在两极之间产生一个静电力,引起膜片发生向下形变的弯曲,从而保证作用在轴向的应力不会使应变梁产生失稳。文中详细给出了工艺流程和测试结果,通过实验测试证明,用这种方法制作的电容应变器件具有良好的线性、较小的滞后和稳定的工作特性,其中应变灵敏度达 10 fMPa ,测量误差小于 $1\% \text{ FS}$ 。

关键词: 可变电容; MEMS; 应变传感器

中图分类号: TP212 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460 4020

MEMS capacitive strain sensor

Feng Yongjian

(Department of Electronic-Mechanical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract This paper introduces a micro capacitive strain sensor fabricated using silicon-glass static bonding technology. The main fabrication process is given in detail. ANSYS software is used to optimize the design. To ensure the stability of the strain sensor, a DC voltage is applied between two electrodes of the capacitor and the established electric field generates a static force, which causes the strain beam to be bended to the substrate so that the stability of the beam can be assured. Sensor test experiments were carried out. Experiment results prove that the proposed strain sensor has excellent linearity, small hysteresis and good stability. The strain sensitivity reaches 10 fMPa and the measurement error is less than $1\% \text{ FS}$.

Key words variable capacitor; MEMS; strain sensor

1 引言

近年来,集成电路技术和微机械加工技术发展迅速,越来越多地被应用于微执行器,如:微马达、微齿轮、微泵、微阀门、微开关、微喷射器、微扬声器、微谐振器等。本文所描述的对象就是一种可应用于工业、航空、军事领域中的 MEMS 可变电容应变传感器。由于采用电容测量的方式,所以相对于压电、压阻、热膨胀和电磁等驱动方式,干扰小、精度高,而且工艺兼容好,可以用体硅和表面微机械加工,便于实现系统集成,其中电容器件所具有的

结构简单、体积小、适应性强、输出能量低、动态响应快等优点得到了进一步的发展。微电容式器件因其结构简单而成为微传感器技术领域中发展较快的一种器件^[1-2],而应变传感器是传感器中的主要敏感器件之一,并被广泛用于各个领域中的应力与应变测量^[3-4]。基于 MEMS 技术的应变电容传感器具有灵敏度高、温度影响小、抗干扰能力强和容易电路集成的特点受到广泛重视^[5-6]。在信号测试方面,具有效率高、精度高、不发热、响应速度快、能量损失小等特点,最主要的是微电容器件技术完全与硅材料、集成电路处理技术相一致,其便于集成化、一体化的优点得到了广泛应用^[7-8]。

2 电容式应变传感器的结构与制作工艺

可变电容器由硅膜片、玻璃、电极构成^[9],如图 1 所示,主要材料和参数如表 1 所示。其中作在玻璃上的电极是静止的电极,由磁控溅射制作于玻璃基板上;另一个电极是柔性可动的硼硅膜梁上电极。

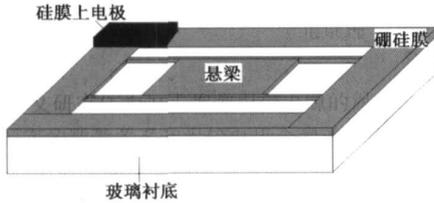


图 1 电容式应变传感器的结构

Fig 1 The structure of the capacitive strain sensor

表 1 主要材料和参数

Table 1 The material and its parameters

Si	玻璃	电极面积 mm ²	绝缘层厚度 A _o	硼硅膜厚 μm	Gap/μm
p-type(100)	7740	0.25	2000	1	1

工作时,由控制电路在电容器的极板之间加一直流静电驱动电压,以保证建立的电场在两极之间产生一个静电力,引起膜片发生形变向下弯曲,变形量随偏置的电压值而改变。这样,可以保证作用在轴向的应力不会使应变梁产生失稳。硼硅膜与衬底之间的电容随硼硅膜的形变而改变;撤掉控制电压后,电场力消失,硅膜片在弹性回复力的作用下只留下应变电容。

主要制作步骤如图 2 所示。主要制作工艺过程如下:

- (1)取 7740 玻璃经表面清洗后,涂胶光刻图形;
- (2)曝光、显影,坚膜;
- (3)Buffer 溶液腐蚀深度至 1 μm^{[10][11]};
- (4)去胶、清洗、光刻、曝光、显影,坚膜、溅射金属;
- (5)湿法去胶;
- (6)硅片,清洗后,在 1125 °C 下进行浓硼扩散 6 h,使其上面形成 P⁺ 膜,再进行 CMP (chemical mechanical polishing)将 P⁺ 膜表面抛光;
- (7)硅、玻璃静电键合;
- (8)用 KOH 溶液深腐蚀键合后位于上方的硅片腐蚀到 P⁺ 膜;
- (9)在 P⁺ 膜上涂光刻胶,烘干后进行离子反应刻蚀,制作梁结构;
- (10)完成以上工作后切割晶片,封装、焊线。

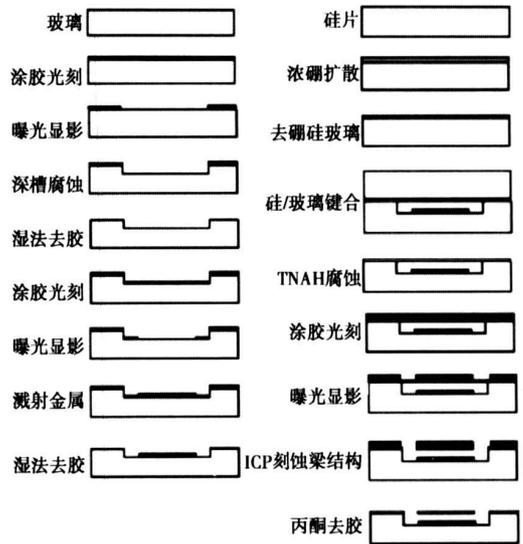


图 2 电容式应变传感器的 MEMS 工艺

Fig 2 The MEMS technology for the capacitive strain sensor

完成的应变传感器如图 3 所示,左边的应变梁与膜电极相连,玻璃电极由 ICP 干法腐蚀玻璃 P⁺ 膜制出。

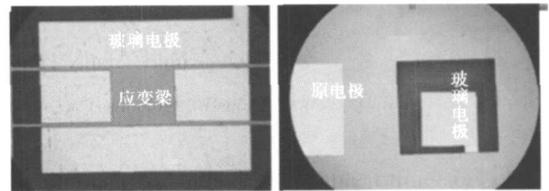


图 3 梁式电容应变传感器

Fig 3 The capacitive strain sensor with beam

3 器件的微电容测试电路与测试

3.1 器件的测试电路

器件的测试电路利用方波激励信号把测量电容的变化转换为直流电压输出,通过输出电压就可以来测量外加的压力大小。采用 CMOS 电路有效地消除杂散电容的影响,利用传输门的开关特性提高了电路的灵敏度。测量电路原理如图 4 所示。电路由方波发生器、开关电路、门控电路和滤波电路构成。方波发生器产生方波信号,作为电路的激励信号。开关电路则由 4 个 CMOS 模拟开关 K₁、K₂、K₃ 和 K₄ 构成,在由 2 个非门 G₁、G₂ 构成的门控电路的控制下,轮流通断,从而使测量电容和参考电容在正负半周轮流与 2 耦合电容构成交流通路,进行充放电。模拟开关由 CMOS 传输门和非门构成。CMOS 传输门由一个 NMOS 管 T_N 和一个 PMOS 管 T_P 并联而成。当 T_N 的控制端为高电平,当 T_P 的控制端为低电平时, T_N 或 T_P 其中之一导通,相当于开关接通;当 T_N 的控制端为低电平,当 T_P 的控制端为高电平时, T_N 和 T_P 同时截止,输入与输

出之间呈高阻状态, 相当于开关断开。在激励信号的正半周, 非门 G_1 的输入为高电平, 输出为低电平; 而 G_2 的输入为低电平, 输出为高电平, 即模拟开关 K_1 的 T_p 管的控制端为低电平, T_n 管的控制端为高电平, 耦合电容 C_1 和参考电容 C_r 之间的模拟开关 K_1 接通。同时, C_1 与测量电容 C_x 之间的模拟开关 K_2 断开; 耦合电容 C_2 与 C_x 间的模拟开关 K_4 接通; C_2 和参考电容 C_r 之间的模拟开关 K_3 断开。激励信号通过耦合电容分别从电路的 A 点、B 点通过模拟开关 K_1 、 K_4 对 C_r 与 C_x 充电, 在耦合电容较大时, 出现在 A、B 点的交流信号的幅值基本上就等于激励信号的幅值。负半周时, 情况与正半周恰好相反, 测量电容 C_x 上的电荷通过模拟开关 K_2 向 A 点放电, 同时参考电容 C_r 上的电荷通过模拟开关 K_3 向 B 点放电, 即在方波激励信号的一个周期内有一定电荷从 A 点经参考电容 C_r 转移到 B 点, 同时也有一定的电荷从 B 点经测量电容 C_x 转移到 A 点。

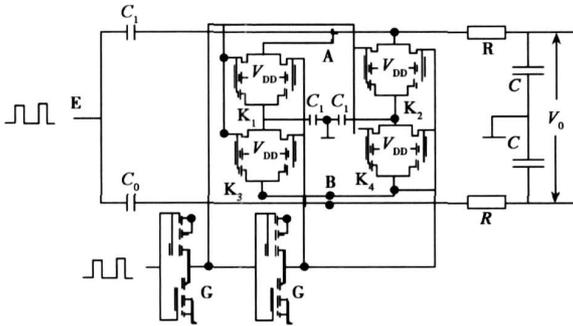


图 4 电容信号测量电路图

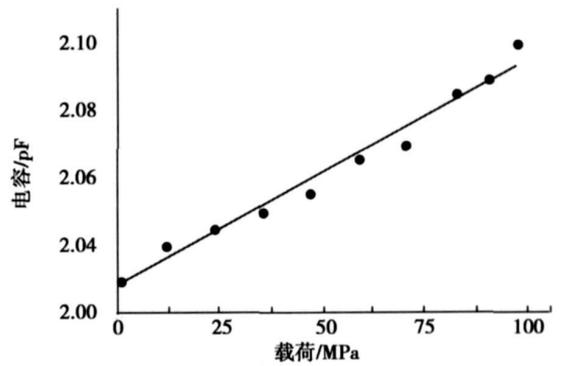
Fig 4 Test circuit for the capacitive strain sensor

如果电路完全对称 (即构成模拟开关的 4 个传输门的特性是一致的, 并且测量电容值等于参考电容值), 则一个周期内从 A 点转移到 B 点的电荷与从 B 点转移到 A 点的电荷相等, A、B 两点之间不存在电势差, 输出电压值为 0。如果测量电容 C_x 受压力作用, 电容值增大, 则这种平衡条件被破坏, 在激励信号的作用下从 B 点转移到 A 点的电荷大于从 A 点转移到 B 点的电荷, 使得在 A 点、B 点积累了一定的净电荷, 从而 A 点电位上升, B 点电位下降, 导致从 A 点转移到 B 点的电荷增加, 从 B 点转移到 A 点的电荷减少。经过若干个周期后, 一个周期内的电荷转移达到动态平衡。达到平衡后, A、B 两点各自的直流电位同叠加在它们上面的交流激励信号通过 RC 低通滤波器后, 输出信号只有直流信号 V_0 (V_0 为 A、B 两点的直流电位差)。输出直流信号大小的变化就可以反映出作用在测量电容 C_x 上压力值的变化。

3.2 测试

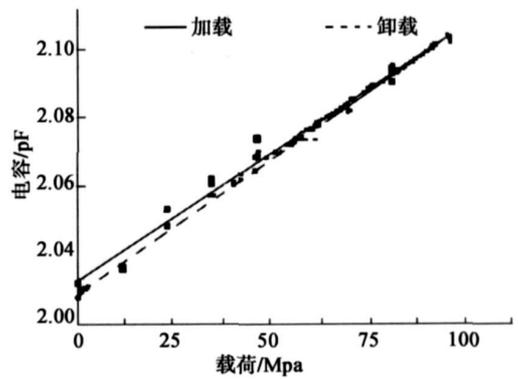
按照图 3 所示的电路, 对制作的 MEMS 应变电容传感器进行测试。测试结果如图 5(a)、(b) 所示, 加载的变

化步长是 10 MPa。图 5(b) 是对器件进行加载、卸载的测试结果, 这里把应力变从 0 变化到 100 MPa 的加载过程定义为正向, 把应力从 100 MPa 变化到 0 的加载过程定义为逆向。根据测试结果, 器件的应变灵敏度达 10 fF/MPa, 测量误差小于 1% F_S 。



(a) 单向加载电容测量值

(a) Measured capacitance value with loading



(b) 正反向加载的测量值

(b) Measured capacitance values for forward and reverse loadings

图 5 应变电容传感器测试曲线

Fig. 5 Testing curve of capacitive strain sensor

4 结 论

通过微型电容式应变传感器的制作及对器件的测试和对测试结果的详细分析, 证明这种电容式应变传感器具有良好的线性工作范围、良好的稳定性和较高的灵敏度。还可以通过改善敏感元件、电容器的物理特性, 优化改变器件的尺寸, 进一步提高器件的线性工作范围、灵敏度等。

参考文献

[1] SHI F, RAMESH P, MUKHERJEE S Simulation methods for micro electro mechanical Structures (MEMS) with application to a micro tweezers [J]. Computer & structures

- 1995, 56(5): 769-783.
- [2] KELLER, HOWE C.G., HEXSIL R.T. Tweezers for tele-operated micro assembly [C]. Micro Electro Mechanical Systems 1997 MEMS'97, Proceedings IEEE., Tenth Annual International Workshop on, 26~ 30 Jan. 1997: 72-77.
- [3] HEERENS W.C., TARASENKO S.D. Absolute strain gauge [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1991, 27(1-3): 829-833.
- [4] ARSHAK K.I., MCDONAGH D., DURCAN M.A. Development of new capacitive strain sensors based on thick film polymer and cement technologies [J]. Sensors and Actuators A, 2000, 79(2): 102-114.
- [5] GIANCHANDANI Y.B., NAJAFI K. Bent Beam strain sensors [J]. IEEE J of Microelectromechanical Systems, 1996, 5(1): 52-58.
- [6] LIN L.W., PISANO A.P., HOWERT. A micro strain gauge with mechanical amplifier [J]. IEEE J of Microelectromechanical Systems, 1997, 6(4): 313-321.
- [7] QUE L., LIM H., CHU L.L., et al. Strain sensor with differential capacitive readout [C]. MEMS'99 12th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical System, 1999: 552-557.
- [8] AKABAYOV B., HENN A., ELBAUM M., et al. RNA Labeling and immobilization for nanodisplacement measurement [J]. IEEE Transactions on Nanobioscience, 2003, 2(2): 153-157.
- [9] LEONARDIM, LEUENBERGER P., BERTRAND D., et al. A soft contact lens with a men's strain gage embedded for intraocular pressure monitoring [C]. Transducers Solid State Sensors Actuators and Microsystems 12th International Conference on, 2003, 2(9-12): 1043-1048.
- [10] 郑志霞, 林雁飞, 冯勇建. 7740玻璃湿法腐蚀凹槽及槽内光刻图形的研究 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2005(3): 370-372.
- ZHENG ZH X, LIN Y F, FENG Y J. Studies of wet etching of 7740 glass and lithography in grooves [J]. Journal of Xiamen University: Natural Science Edition, 2005(3): 370-372.
- [11] 林雁飞, 郑志霞, 张丹, 等. PYREX玻璃湿法凹槽腐蚀研究 [J]. 微纳电子技术, 2005(1): 33-36.
- LIN Y F, ZHENG ZH X, ZHANG D, et al. Research of wet etching groove on PYREX glass [J]. Microelectronics, 2005(1): 33-36.

作者简介



冯勇建, 1994年于西南石油学院获得博士学位, 1997在浙江大学攻读博士后, 2001在美国凯斯大学做访问学者。现在厦门大学物理机电学院任教, 主要研究方向为MEMS传感器、执行器与IC集成电路设计。
E-mail: yjfeng@xmu.edu.cn

Feng Yongjian received PhD from South West Petroleum University in 1994, was a post doctor in Zhejiang University in 1997 and a visitor scholar in Case Western Reserve University, America between 2000 to 2001. Now he works in Physical and Mechanical College, Xiamen University. His main research directions are MEMS sensor, actuator and IC design.
E-mail: yjfeng@xmu.edu.cn