

CMOS 工艺兼容的单片集成湿度传感器*

彭韶华[†] 黄庆安 秦 明 张中平

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 设计并制备了一个 CMOS 工艺兼容的集成湿度传感器, 将湿度传感器与 CMOS 测量电路集成在同一芯片上. 片上集成的湿度传感器为叉指电容式, 感湿介质为聚酰亚胺, 本文给出了相应的感湿模型. 针对湿度传感器在全量程电容变化量较小的特点, 本文采用开关电容电路作为片上微电容测量电路, 讨论了电路的原理并给出了模拟结果. 芯片采用 3 μm 多晶硅栅标准 CMOS 工艺进行流水. 测量结果表明, 片上集成湿度传感器在 5~35 有较好的直流输出特性, 并且长时间稳定性良好.

关键词: 开关电容电路; 聚酰亚胺; CMOS 兼容工艺; 湿度传感器

EEACC: 1220B; 2180B; 2575F

中图分类号: TP212. 12

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)02-0358-05

1 引言

系统的微型化、集成化和智能化是未来传感器发展的方向^[1]. 将微结构传感器与周围的接口电路集成在同一芯片上, 可以实现更多的功能和更高的性能, 同时降低传感器的成本, 实现系统芯片(SOC). 通过系统集成, 传感器和接口电路可以尽可能地接近, 从而在很大程度上降低寄生参数和外部的干扰. 采用标准 IC 工艺将传感器和接口电路单片集成, 可以实现低成本批量制造, 然而系统封装以及微弱信号检测电路的设计依然对单片集成的传感器设计和加工提出了挑战. 早在 1988 年, 英国 Silverthorne^[2] 第一次尝试将湿度传感器与测量电路单片集成在同一芯片上, 湿度传感器为三明治结构, p^+ 重掺杂区作为电容下极板, 多孔金属作为电容上极板, 上下极板间夹了层感湿聚合物, 环境中的水汽分子通过多孔上极板进入感湿聚合物, 改变聚合物的介电常数, 从而引起湿度传感器电容值的变化. 感湿聚合物以及多孔金属在标准 CMOS 制造中属于非标准工艺, 因此在制造完电路后还要添加多步后处理工艺才能完成片上集成湿度传感器的制作.

本文在前期 CMOS 兼容的湿度传感器研究的基础上^[3-5], 采用标准 CMOS 工艺加一步简单后处理将湿度传感器与处理电路制作在同一块芯片上, 实现了传感器与处理电路的片上集成. 湿度传感器采用平铺叉指电容结构, 湿敏介质为上海交通大学

化学系生产的 PI-5 型聚酰亚胺, 考虑到湿敏电容全量程变化较小, 在几个 pF 量级, 属于微小电容测量, 开关电容电路能提供精确的微电容测量^[6], 因此芯片的片上电路就采用开关电容电路这种形式. 对芯片进行了测试, 测试结果表明, 本文制作的 CMOS 工艺兼容的片上集成湿度传感器在 5~35 有较好的直流输出特性, 并且长时间稳定性良好.

2 设计

2.1 片上集成湿度传感器结构

图 1 给出了片上集成湿度传感器芯片的剖面图. 从图中可以看出, 芯片的左侧是 p 阱工艺标准 CMOS 电路, 芯片最右侧为 CMOS 工艺兼容的湿度传感器. 处理电路中采用 MOS 电容作为固定电容, 即 p^+ 注入层作为固定电容下极板, 栅氧化层作为介质, 上极板为多晶硅. 因为栅氧化层比较薄, 一般为几十个纳米, 且均匀性好, 这样可以在较小的版图面积上产生较大的固定电容, 并且电容值比较精确. 图 2 为湿度传感器铝层平面结构图. 湿度传感器采用铝叉指电容结构, 在叉指结构上涂覆了一层聚酰亚胺作为感湿介质, 当外界湿度变化时, 感湿膜聚酰亚胺的介电常数发生变化, 从而导致叉指电容的变化, 通过片上电路可以实现对湿敏电容的检测, 从而获得相应的环境湿度信息. 将湿度传感器与片上电路集成在一起能大大降低寄生电容, 增强了传感器的

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2004AA404030), 国家自然科学基金(批准号:60476019)和江苏省自然科学基金(批准号:B K2003052)资助项目

[†] 通信作者. Email:psh0315@163.com

2005-07-28 收到, 2005-10-23 定稿

抗干扰能力.

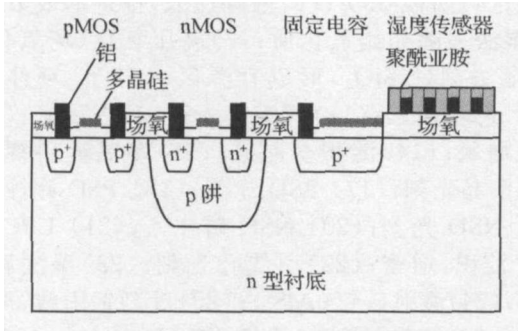


图 1 片上集成湿度传感器芯片剖面图

Fig. 1 Cross-section of integrated relative humidity sensor

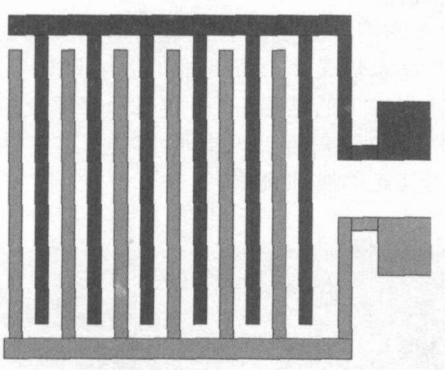


图 2 湿度传感器铝层平面结构图

Fig. 2 Schematic structure of aluminum layer

2.2 感湿模型及有限元模拟

讨论湿敏电容的感湿机理主要是给出聚酰亚胺吸收水分子后体系介电常数的理论公式. 利用 Looyenga^[7] 的半经验公式结合 Shibata^[8] 的有关固体吸收水分与环境相对湿度的关系式推导出混合体的介电常数表达式为:

$$= [0.0404 \times \frac{0.836}{1+0.0049} (78.54^{\frac{1}{3}} - 3.2^{\frac{1}{3}}) + 3.2^{\frac{1}{3}}]^3 \quad (1)$$

(1) 式给出了常温 (298 K) 下, 相对湿度和混合体介电常数的关系式. 通过计算可以得到相对湿度从 0 变化到 100 % RH 时, 介电常数从 3.2 变化到 4.0.

根据 Gerwen 提出的电容计算模型^[9] 可以计算出叉指电容值, 其表达式如下:

$$C_{PI} = \frac{n \cdot l \cdot h_{finger}}{W_{gap}} + \frac{n \cdot l}{2} \quad (2)$$

式中 n 是叉指电极和铝电阻条总数; ϵ 是聚酰亚胺吸湿后混合体的介电常数; h_{finger} 是叉指的厚度, 即铝层的厚度; W_{gap} 是电阻条和叉指电极间距. 根据本文所设计的湿度传感器结构参数以及上面推导得到的聚酰亚胺介电常数的变化范围可以计算出环境相对湿度从 0 变化到 100 % RH, 湿敏电容变化的

理论值为 12.08 ~ 14.19pF, 变化量为 2.11pF.

本文使用有限元分析软件 COVENTOR 对叉指电容进行了模拟. 考虑到叉指电容是大量的重复单元, 本文选取了两组叉指进行了模拟, 通过电荷密度分布可以计算出存储在电容器中的能量, 然后通过公式 (3) 来计算叉指电极和铝电阻条构成的电容器的电容.

$$C = \frac{2W}{(V_1 - V_0)^2} \quad (3)$$

式中 W 是存储在电容器中的能量; V_1 和 V_2 分别是电容极板两端的电势.

2.3 接口电路设计及模拟

由上述感湿模型推导得到湿敏电容全量程变化只有 2.11pF, 属于微小电容测量. 在存在寄生电容的情况下开关电容电路能提供高精度的微小电容测量, 因此本文的片上集成测量电路采用开关电容电路的形式. 如图 3 所示, 电路由湿敏电容 C_s 、参考电容 C_r 、反馈电容 C_f 、运算放大器及开关 $S1$ 和 $S2$ 等组成. 在分析此电路前, 我们需要作一些假设, 比如

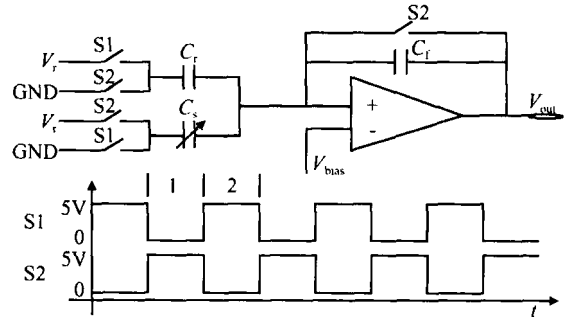


图 3 微电容测量框图

Fig. 3 Micro-capacitance measurement circuits

忽略运算放大器的失调电压, 忽略节点的寄生电容, 忽略开关动作时引起的电荷注入效应等, 并假设运算放大器的开环增益无穷大, 满足虚短虚断的特性. 开关 $S1$ 和 $S2$ 由 nMOS 管组成, 开关 $S1$ 和 $S2$ 受如图 3 所示的时钟脉冲电压控制开和闭. 电路工作分两步进行: 在阶段 1, 开关 $S1$ 受低电平控制断开, 开关 $S2$ 受高电平控制闭合. 此时运算放大器输出端与正输入端短接, 根据运算放大器虚短虚断的特性, 输出电压等于运算放大器负输入端的偏置电压. 电源电压 V_r 对湿敏电容 C_s 进行充电, 参考电容 C_r 接地放电, 此时存储在运算放大器正输入端的电荷总量为:

$$Q_1 = (V_{bias} - V_r) C_s + V_{bias} C_r \quad (4)$$

在阶段 2, 开关 $S1$ 受高电平控制闭合, 开关 $S2$ 受低电平控制断开. 此时湿敏电容接地放电, 电源电压 V_r 对参考电容 C_r 进行充电, 反馈电容 C_f 将运算

放大器的输出端与正输入端连接起来,控制运算放大器的闭环增益.此时存储在运算放大器正输入端的电荷总量为:

$$Q_2 = V_{\text{bias}} C_s + (V_{\text{bias}} - V_r) C_r + (V_{\text{bias}} - V_{\text{out}}) C_f \quad (5)$$

根据电荷守恒原理,得到阶段 2 中的输出电压表达式为:

$$V_{\text{out}} = \frac{V_r (C_s - C_r)}{C_f} + V_{\text{bias}} \quad (6)$$

从输出电压的表达式可以看出,输出电压 V_{out} 与湿敏电容 C_s 成正比,电源电压 V_r 和反馈电容 C_f 的比值控制电路的闭环增益.根据 2.2 中感湿模型的计算,湿敏电容 C_s 的变化范围为 12.08 ~ 14.19 pF,因此本文将参考电容 C_r 和反馈电容 C_f 均设计为 10 pF,电源电压为 5 V,运算放大器负输入端的偏置电压为 0.5 V.当环境湿度发生变化时,湿敏电容 C_s 发生改变从而导致阶段 2 输出电压 V_{out} 发生改变.本文采用两级差分运算放大器作为理想运放,采用 nMOS 管实现开关,片外输入时钟脉冲实现开关的开启与闭合.运算放大器的设计是实现片上微电容测量的关键,运算放大器越理想,电容测量越精确.本文设计的运放开环增益为 14800,比较接近运放的理想状态.图 4 给出了电路的模拟结果, V_{in} 是片外所加的用来控制 MOS 开关的时钟脉冲,摆幅为 0 ~ 5 V,周期为 5 kHz.从模拟结果可以看出, V_{out} 在阶段 1 被钳位在运放的负输入端偏置电压,为 0.5 V,在阶段 2, V_{out} 输出一个与湿敏电容成正比的直流电平.

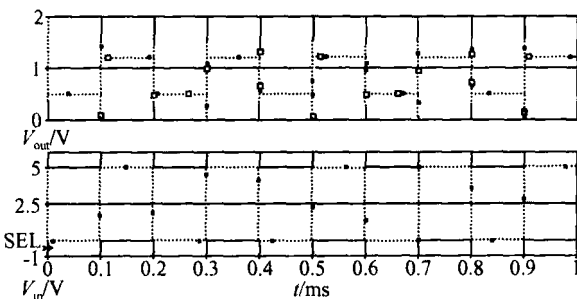


图 4 开关电容电路模拟结果

Fig. 4 Simulation results of switched-capacitor circuits

3 制备工艺

CMOS 工艺兼容的片上集成湿度传感器采用 3 μm 多晶硅栅 p 阱工艺进行流水,流水共使用 11 块掩膜版,前 10 块掩膜版为标准 CMOS 工艺形成处理电路,最后一块掩膜版为后处理版,用来光刻腐蚀湿敏介质聚酰亚胺.具体的工艺步骤分别为:(1)

采用 100 nm n 型(100)硅片;(2)初始氧化;(3) p 阱光刻;(4)腐蚀 SiO₂;(5)浓硼注入,推进形成 p 阱;(6)湿法去除初始氧化层;(7)高压氧化(场氧化);(8)湿法刻蚀 SiO₂,形成有源区;(9) p⁺ 环注入;(10) n⁺ 环注入;(11)调沟注入;(12)去预氧;(13)生长栅氧;(14)淀积多晶硅;(15)多晶硅磷掺杂;(16)多晶光刻;(17) PSD 光刻;(18) PSD 硼注入;(19) NSD 光刻;(20) NSD 磷注入;(21) LPCVD SiO₂ 淀积,增密;(22)引线孔光刻;(23)湿法腐蚀 SiO₂;(24)溅射硅铝(AlSi);(25)反刻铝引线,腐蚀硅铝;(26)钝化层淀积(淀积 SiO₂ 和 Si₃N₄);(27)钝化层光刻;(28)钝化层腐蚀,露出铝压焊块和铝叉指;(29)涂覆聚酰亚胺并光刻;(30)腐蚀聚酰亚胺;(31)亚胺化.

图 5 和图 6 分别是后处理前后铝叉指的对比照片.图 5 显示铝叉指线条完整,没有出现断条、连条现象,证明加工的准确性.图 6 显示聚酰亚胺为半透明物质,均匀覆盖在铝叉指电容上,其边界线条笔直,证明其光刻腐蚀良好.

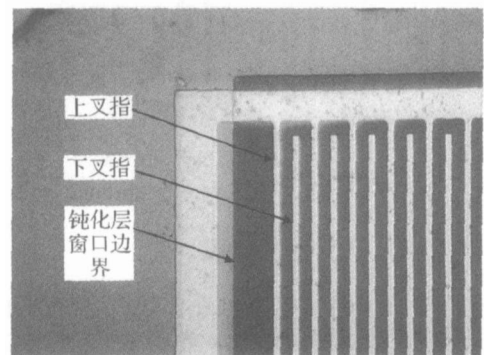


图 5 未涂聚酰亚胺的铝叉指电容

Fig. 5 Interdigital capacitance without polyimide deposition

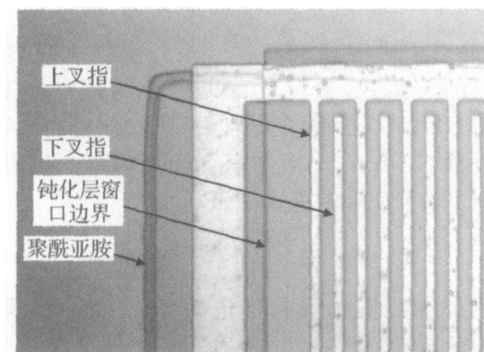


图 6 涂过聚酰亚胺的铝叉指电容

Fig. 6 Interdigital capacitance with polyimide deposition

4 实验结果及讨论

本文对片上集成的湿度传感器作了相应测试. 使用太航航空仪表集团生产的 SYS-D-1 型双压湿度发生器(二级)作为标准湿度检测箱, 它能产生的温度范围为 $-10 \sim 40$, 湿度范围为 $15\% \text{RH} \sim 95\% \text{RH}$. 将片上集成的湿度传感器放入湿度检测箱中, 调节湿度发生器从 $15\% \text{RH}$ 上升到 $95\% \text{RH}$, 每隔 $15\% \text{RH}$ 作为一个测试点, 等湿度检测箱显示的相对湿度稳定并且示波器显示的输出波形稳定后读出每个相对湿度下的输出直流电平值. 图 7 是 $30\% \text{RH}$, 25 下数字示波器显示的读数, 图中 B 曲线表示片外输入的时钟脉冲 V_{in} , 摆幅 $0 \sim 5\text{V}$, 周期为 5kHz , 它用来控制 MOS 开关的开启和闭合, A 曲线代表输出信号 V_{out} . 图 7 显示在阶段 1, V_{out} 被钳位在运放负端输入偏置电压为 0.5V ; 在阶段 2, V_{out} 输出与湿敏电容成比例的稳定的直流电平, 这与 2.3 节中的电路模拟结果相吻合. 图 8 给出了不同温度下相对湿度与直流电平的关系曲线. 从曲线上可以看出, 在低湿部分输出直流电平与相对湿度有较好

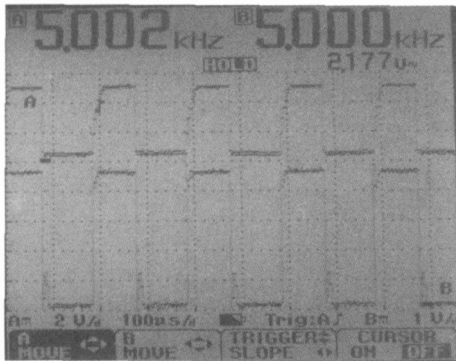


图 7 示波器读数(25 ,30 %RH)
Fig. 7 Readout of oscilloscope at 25 ,30 %RH

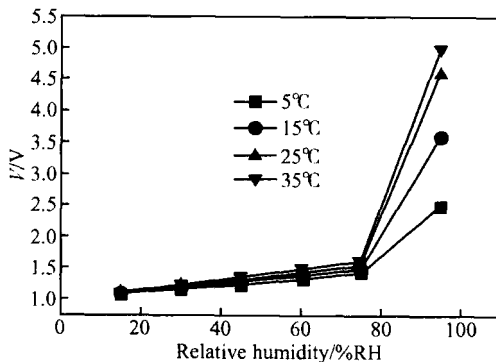


图 8 不同温度下相对湿度与输出直流电平关系曲线
Fig. 8 DC output versus relative humidity at different temperatures

的线性关系. $5, 15, 25, 35$ 时分辨率分别为 $5.32, 6.00, 6.67$ 和 $8.01\text{mV}/\% \text{RH}$. 而在高湿区, 输出直流电平陡升, 尤其在 35 时靠近 $100\% \text{RH}$ 处, 输出直流电平接近 5V 电源电压. 这是由于湿敏电容在高湿和低湿区的感湿机理发生改变所致, 在低湿区化学吸附起主导作用, 在高湿区水汽接近饱和, 物理吸附起主要作用. 化学吸附对聚酰亚胺相对介电常数的改变比较小, 聚酰亚胺在高湿下的相对介电常数为 4 左右. 而高湿区物理吸附易使聚酰亚胺表面形成水膜, 水的相对介电常数接近 80 , 因此高湿区湿敏电容值比低湿区大大提高. 根据 2.3 节中的公式(10), 湿敏电容 C_s 在高湿区的突然变大会使输出电压 V_{out} 突变, 有时甚至超过电源电压, 导致运放输出管一个饱和和一个截止, 输出电压近似等于电源电压. 高湿区输出电压饱和的问题可以通过适当降低运放开环增益来解决. 运放开环增益的降低可以有效增大运放共模输入电压的范围, 当然运放开环增益的过份降低会带来其非理想性因素的增大, 合理设计运放参数和湿敏电容的值使两者匹配起来这是最终也是最有效的解决办法.

本文对单片集成湿度传感器长时间稳定性进行了测试, 在 $25, 60\% \text{RH}$ 下每周测试一次, 连续测 4 次. 测试结果显示, 输出直流电平偏差在 $\pm 3\%$ 左右, 说明其长时间稳定性良好.

5 结论

本文设计并制作了一个 CMOS 工艺兼容的片上集成湿度传感器, 给出了感湿理论模型并用有限元软件 COVENTORWARE 进行了模拟, 对传感器的性能进行了测试并分析了测试结果. 采用标准 CMOS 工艺并简单后处理将湿度传感器与处理电路制作在同一块芯片上, 实现了传感器与处理电路的片上集成, 大大提高了传感器的可靠性及抗干扰能力, 对未来智能湿度传感器的设计具有一定的参考价值.

参考文献

- [1] Qu W, Wlodarski W. A novel multi-functional thin-film sensor for ozone, humidity and temperature. Proc Transducers, 1999:664
- [2] Silverthorne S V, Watson C W, Baxter R D. Integrated relative humidity sensor. IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 1988:67
- [3] Gu L, Huang Q A, Qin M. A novel capacitive-type humidity sensor using CMOS fabrication technology. Sensors and Actuators B, 2004, 99(5):491
- [4] Gu Lei, Huang Qing'an, Qin Ming, et al. A novel humidity sensor compatible with CMOS technology. Chinese Journal

- of Semiconductors, 2004, 25(2):174 (in Chinese) [顾磊, 黄庆安, 秦明, 等. 一种新型 CMOS 兼容湿度传感器. 半导体学报, 2004, 25(2):174]
- [5] Peng Shaohua, Huang Qing'an, Qin Ming, et al. Fabrication of CMOS compatible one-bodied humidity and temperature sensor. Chinese Journal of Semiconductors, 2005, 26(7):1428 (in Chinese) [彭韶华, 黄庆安, 秦明, 等. CMOS 工艺兼容的温湿度传感器. 半导体学报, 2005, 26(7):1428]
- [6] Park Y E, Wise K D. An MOS switched-capacitor readout amplifier for capacitive pressure sensors. Proc of the IEEE Custom IC Conf, 1983:380
- [7] Schubert P J, Nevin J H. A polyimide-based capacitive humidity sensor. IEEE Trans Electron Devices, 1985, 32(7):1220
- [8] Shibata H, Ito M, Asakura M, et al. A digital hygrometer using a polyimide film relative humidity sensor. IEEE Trans Instrumentation and Measurement, 1996, 45(2):564
- [9] Van Gerwen P. Nanoscaled interdigitated electrode arrays for biochemical sensors. Sensors and Actuators B, 1998, 49(5):73

Research on CMOS Compatible Integrated Humidity Sensors^{*}

Peng Shaohua[†], Huang Qing'an, Qin Ming, and Zhang Zhongping

(Key Laboratory of MEMS of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract : A CMOS compatible integrated humidity sensor is designed and fabricated. The humidity sensor and CMOS circuits are fabricated at the same chip. The humidity sensor employs an interdigital finger structure and a polyimide sensing material. A humidity sensing model is given. Because of minor capacitance variation during the full range, switched-capacitor techniques are employed in measurement circuits. The principle of the circuits is discussed, and simulation results are presented accordingly. The design, implemented in a 3 μ m polysilicon-gate CMOS, results in a good DC output at 5~35 and a long time stability.

Key words : switched-capacitor circuits; polyimide; CMOS compatible technology; humidity sensor

EEACC : 1220B; 2180B; 2575F

Article ID : 0253-4177(2006)02-0358-05

^{*}Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(No. 2004AA404030), the National Natural Science Foundation of China(No. 60476019), and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province(No. B K2003052)

[†]Corresponding author. Email:psh0315@163.com

Received 28 July 2005, revised manuscript received 23 October 2005

© 2006 Chinese Institute of Electronics