

一种新型 CMOS 兼容湿度传感器

顾 磊 黄庆安 秦 明 张中平 严先蔚

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 给出了与 CMOS 工艺兼容的一种新型梳齿状湿度传感器的结构、工艺流程及其测试结果. 利用 Coventor 软件对这种新型结构进行了理论分析, 对制备出的湿度传感器的性能如灵敏度、滞回特性、重复性、响应时间等进行了测试并讨论. 结果表明文中提出的 CMOS 湿度传感器工艺简单、响应时间快、成本低、灵敏度高, 有望在实际中得到应用.

关键词: 湿度传感器; 微电子机械系统; CMOS; MEMS

EEACC: 2575; 7230

中图分类号: TP212.12

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)02-0174-05

1 前言

湿度传感器在环境测量中具有重要的意义, 如厂房、仓库、高速公路以及农业生产中的测量, 此外湿度也与人们的日常生活密切相关.

目前环境检测中实际应用的大都是传统的湿度传感器, 如干球湿度计、露点湿度计等. 这些湿度传感器存在以下几种缺点: (1) 相同产品的一致性差; (2) 价格昂贵; (3) 体积大. 微湿度传感器主要有陶瓷湿度传感器、多孔硅和 CMOS 三种类型. 多孔硅湿度传感器的孔隙及孔径大小的控制很困难, 一致性也不够好, 其感湿机理比较复杂^[1]. 半导体陶瓷湿度传感器也存在上述问题^[2]. 1990 年, Baltes 最早提出了利用 CMOS 工艺制造湿度传感器^[3], 它的结构比较简单, 缺少加热除尘结构, 长期的可靠性稍差. 此后湿度传感器的研究重点就放在了与 CMOS IC 兼容上. 利用标准的 CMOS IC 工艺将湿度传感器做在硅片上, 利于集成; 一方面使得传感器的灵敏度、线性度、精确度以及接口电路性能得到提高, 明显减小了器件尺寸. 另一方面, 利用 IC 技术制造传感器是一种低值、可批量生产的技术^[4,5].

当前对湿度传感器的研究主要是利用与标准的

CMOS 工艺相兼容的技术将湿度传感器集成在硅片上, 从而制造出一种具有精确、可靠、成本低的湿度传感器. 本文给出了一种与 CMOS 工艺兼容的新型湿度传感器, 并对其性能进行测量分析和讨论, 结果有助于 CMOS 湿度传感器的设计.

2 湿度传感器结构

湿度传感器工作原理为感湿介质吸附/脱附空气中的水气分子引起介质介电常数的变化, 从而引起电容值变化. 其结构如图 1 和 2 所示.

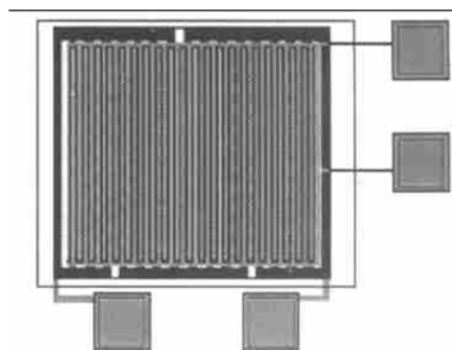


图 1 湿度传感器的结构图

Fig. 1 Schematic structure of humidity sensor

顾 磊 男, 1980 年出生, 硕士研究生, 主要研究领域有 CMOS 兼容湿度传感器、MEMS 等.

黄庆安 男, 1963 年出生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域有微电子、MEMS 等.

秦 明 男, 1967 年出生, 教授, 主要研究领域有微电子、MEMS 等.

2003-02-13 收到, 2003-05-29 定稿

©2004 中国电子学会

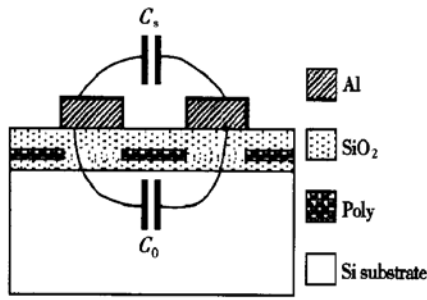


图 2 湿度传感器的简化模型

Fig. 2 Schematic model and cross-section of sensor

此结构湿度传感器的感湿介质为空气, 采用交叉指形电容结构. 电容器的两个电极材料为铝, 铝条及铝条间的空隙暴露在空气中. SiO₂ 层下的多晶硅层用作加热电阻, 湿度传感器工作时可利用热效应排除沾在湿度传感器表面的可挥发性物质.

3 湿度传感器理论模型

湿空气是由干空气及水蒸气这两个组元所构成的、变成分的理想气体混合物. 利用热力学性质和电介质物理相关理论^[6,7], 得出

$$\epsilon_{\text{air}} = 1 + \frac{\varphi p_w}{100 \epsilon_0 k T} (\alpha_{\text{vapor}} - \alpha_{\text{dry-air}} + \frac{\mu_{\text{vapor}}^2}{3kT}) + \frac{\alpha_{\text{dry-air}}}{\epsilon_0} \times \frac{p}{kT} \quad (1)$$

式中 p_w 为饱和水汽压, 只与温度有关; p 为空气中的大气压强; φ 为相对湿度; α 为气体的电子极化率; μ 为气体分子的固有偶极距. 从而建立相对湿度 φ 与传感器电容 C 的关系模型.

理论推导得出的介电常数与相对湿度、温度、压强的关系曲线如图 3 和 4 所示.

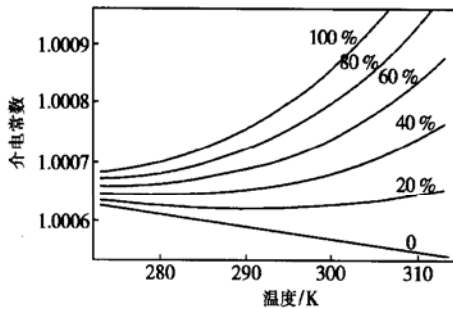


图 3 $p = 10^5 \text{ Pa}$ 时的介电常数与温度关系曲线

Fig. 3 Dielectric constant versus temperature $p = 10^5 \text{ Pa}$

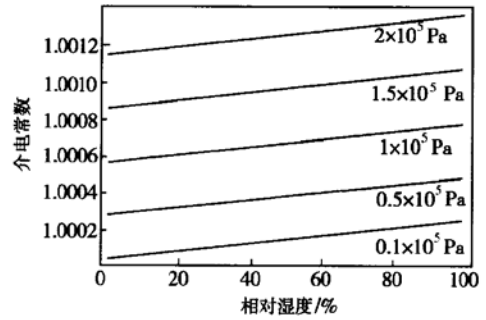


图 4 $T = 293.2 \text{ K}$ 时的介电常数与相对湿度关系曲线

Fig. 4 Dielectric constant versus relative humidity $T = 293.2 \text{ K}$

从上面的介电常数与相对湿度、温度、压强的关系图, 我们得出: 在一个标准大气压下, 温度为 293.16K, 湿度从 0 变化到 100%, 介电常数从 1.00058 变化到 1.00078. 还可以得出: 在一定压强下, 温度越高相对湿度的变化对介电常数的影响越大; 在一定温度和湿度下, 大气压强的变化也将导致介电常数的变化, 它们之间成正比例关系, 但是不同的大气压强并不影响相对湿度与介电常数关系曲线的斜率. 由于温度与压强对介电常数的影响较大, 因此在湿度传感器测量的时候必须考虑当时的温度与压强.

利用 Coventor 软件进行模拟得到在一个标准大气压下, $T = 393.16 \text{ K}$ 时, 相对湿度与传感器理论电容变化值关系曲线, 如图 5 所示.

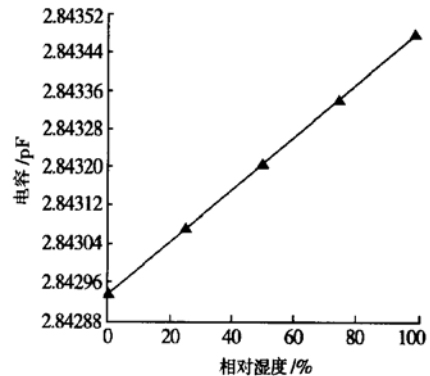


图 5 Coventor 软件计算的电容变化曲线

Fig. 5 Capacitance versus RH by Coventor software simulation

由于表面吸附理论的不健全, 在利用 Coventor 进行分析时, 忽略了表面吸附的影响. 可以看出该结构全量程敏感电容变化值为 $5.5 \times 10^{-4} \text{ pF}$, 电容变化值很小. 采用梳状结构可以增大总的电容变化量,

通过对这种新型湿度传感器的理论分析,可以简单认为敏感电容 C_s 的值只与空气的介电常数有关,因而将它等效于一个理想平行板电容,如图 2 所示.

总电容 C 为:

$$C = C_0 + C_s = C_0 + \frac{\epsilon_{air} S_{eff}}{d} \quad (2)$$

式中 S_{eff} 为 C_s 换算成理想平行板电容时的等效面积, (C_0, C_s) 可利用有限元分析工具计算得到; d 为间距.

结合 Coventor 计算出的电容曲线变化图可以得出 C_0 和 S_{eff} 的值,从而建立起相对湿度与敏感电容之间的理论关系.

4 传感器制备工艺

湿度传感器制备采用与 CMOS 兼容的工艺,保持 CMOS IC 工艺流程次序不变、条件不变,将湿度传感器做在硅片上,采用这种模式可以减小传感器面积,使 IC 制作能力得到扩展,降低传感器成本,提高一致性.

工艺步骤简单,先在硅衬底上长一层薄氧,然后淀积 $0.3\mu\text{m}$ 多晶,光刻成 S 形加热电阻, CVD 淀积生长一层 $1\mu\text{m}$ SiO_2 , 再淀积一层 $1\mu\text{m}$ 的铝作为电极,光刻形成对梳状铝条电极,整个结构的尺寸为 $420\mu\text{m} \times 504\mu\text{m}$.

整个工艺流程如图 6(a) 所示,制备出的芯片如图 6(b) 所示.

5 结果与讨论

对湿度传感器的测试采用天津气象海洋仪器厂的 DJM 4 型湿度检测箱,测量相对湿度变化范围为 25% ~ 90%. 测量过程压强保持为 $1.1 \times 10^5 \text{Pa}$, 温度保持为 22.8°C .

5.1 传感器灵敏度及滞回特性的测量

湿度传感器的灵敏度 (S) 定义为变化的电容值与所对应的相对湿度变化值之比,即

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta \text{RH}(\%)} \quad (3)$$

测量得到的曲线如图 7 所示. 从图中可以看到实际的总敏感电容变化很明显: 从相对湿度为 25% 时的 28pF 变化到相对湿度为 90% 时的 78pF , 总的

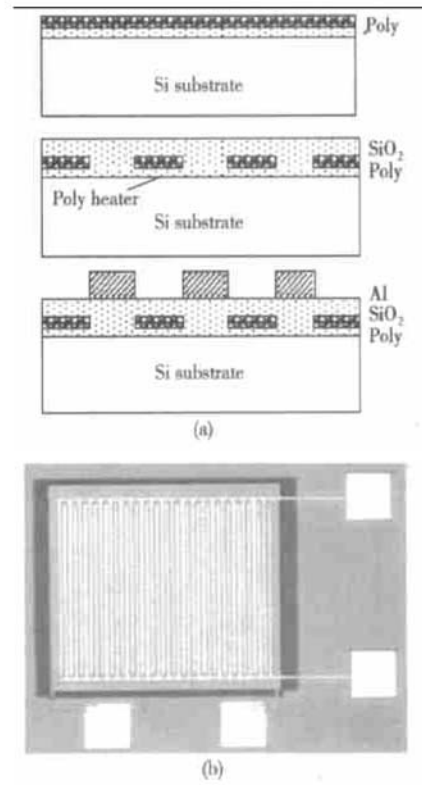


图 6 (a) 湿度传感器工艺流程; (b) CMOS 集成湿度传感器的版图
Fig. 6 (a) Process of humidity sensor; (b) Photograph of CMOS integrated humidity sensor

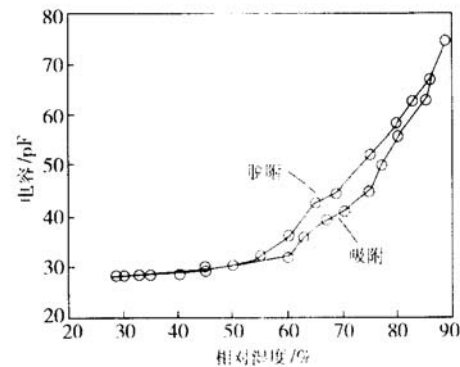


图 7 湿度传感器灵敏度和滞回特性 $p = 1.1 \times 10^5 \text{Pa}$, $T = 22.8^\circ\text{C}$
Fig. 7 Sensitivity and hysteresis measurement $p = 1.1 \times 10^5 \text{Pa}$, $T = 22.8^\circ\text{C}$

电容变化为 50pF ; 但随着相对湿度值的减小,敏感电容的变化也相对减少,灵敏度降低,当相对湿度在 50% 以下时湿度传感器的灵敏度大约为 $0.1\text{pF}/\% \text{RH}$; 但到了高湿情况,湿度传感器的灵敏度大约为 $1.3\text{pF}/\% \text{RH}$. 该湿度传感器的灵敏度随相对湿度值的增加而增加.

图 7 还给出了湿度传感器吸附/脱附的滞回曲线. 对于同样的相对湿度值, 脱附时的电容值比吸附时的电容值要大. 滞回特性略有偏差, 最大湿滞 < 11%.

5.2 重复性

图 8 为对同一结构测量吸附/脱附两个过程得到的曲线.

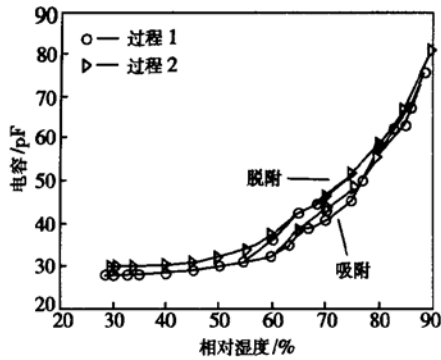


图 8 重复测量拟和曲线

Fig. 8 Curve of sensor repeated measurement

两次测量过程曲线拟和在一起, 我们发现其中一条曲线在起始和结束时候的电容值均大于另一条曲线. 这是由于每次测量结束都需要打开仪器给里面的湿球加水, 因此两条曲线会有少许误差. 从总的趋势来看, 该湿度传感器单个使用的重复性比较好.

由于测量条件的限制, 无法对响应时间进行准确测量, 但从测量过程中估测该湿度传感器的响应时间很短.

6 结果分析

将测量得到的曲线与利用 Coventor 软件模拟得到的曲线进行比较, 可以看出对于实际的湿度传感器, 它的电容变化曲线非线性, 且变化值远大于理论简化模型的电容变化值. 因此看出: 传感器结构表面对空气中水气分子的吸附, 使其成为影响敏感电容变化的主要因素, 而空气介电常数随相对湿度的变化对敏感电容的影响却成为次要的因素.

由于电容型湿度传感器电容的两极是铝材料制成的, 铝电极的表面通常会形成 2.5~ 3.0nm 的薄氧化层. 氧化铝和二氧化硅层明显地存在着两种不同的物理结构: 有孔的和无孔的场氧、氧化铝. 大气中水汽的表面吸附可以认为是物理吸附和化学吸附

并存.

Brunauer, Emmett 和 Teller 在 1938 年提出了多分子吸附理论, 即在一定温度下, 当吸附达到平衡后, 气体的吸附量等于各层吸附量总和. 吸附量与平衡压力之间存在下列定量关系^[8]:

$$V = \frac{V_m C p}{(p^0 - p)[1 + (C - 1)p/p^0]} \quad (4)$$

上式简称 BET 吸附公式, 式中 p 是在实验温度下被吸附气体的平衡压力; p^0 是在实验温度下被吸附气体的饱和蒸气压. 在具体计算时, p 和 p^0 采用相同的单位即可; V 是吸附量; V_m 是第一层盖满时的吸附量; C 是和吸附热及被吸附气体的液化热有关的常数.

因为实际上固体的表面是不均匀的, 表面各处的吸附能力是不相同的, 吸附热也有所差别. 认为被吸附在同一层上的分子之间无作用力, 而上下分子之间有吸引力(范氏力), 这种观点的理由也是不充分的. 另外, 在低温、高压下气体在吸附剂的毛细孔内, 可能发生毛细管凝结现象等因素也未考虑. 如果考虑到这些因素, 对上述公式加以校正, 则能得到一个较复杂的公式, 但该公式的实用价值不大.

由于吸附理论的不完善, 无法推导出吸附的具体公式, 但是可以看出: 空气中的水分子被吸附于场氧和氧化铝表面时形成一层很薄的水膜, 固体表面的水膜将引起敏感电容的介电常数发生较大的变化, 影响电容型湿度传感器的性能.

在设计中可以采取一些措施使其具有如下特点: (1) 避免金属电极被湿空气氧化; (2) 尽可能减小不平整的表面吸附对湿度传感器一致性的影响; (3) 增大灵敏度, 减小滞回曲线的偏差; (4) 采取有效封装, 减小空气中尘埃等大分子对湿度传感器性能所带来的不利影响.

7 结论

采用与标准 CMOS 工艺兼容的技术制造的湿度传感器具有结构简单、体积小、成本低等特点. 对该湿度传感器进行测量分析和讨论的结果表明: 该传感器的重复性、灵敏度比较好, 响应时间快, 具有一定的实际应用价值.

参考文献

[1] O'Halloran G M, Sarro P M, Groeneweg J, et al. A bulk mi-

- chromachined humidity sensor bases on porous silicon. IEEE Transducers '97, 1997: 563
- [2] Hu X Z. The analysis of the semiconductor ceramic humidity sensors component. Chinese Journal of Semiconductors, 1995, 16(1): 56(in Chinese)[胡绪洲. 半导陶瓷湿度传感器的组分分析. 半导体学报, 1995, 16(1): 56]
- [3] Baltes H, Charbon E, Parameswaran M, et al. Humidity-sensitive oscillator fabricated in double poly CMOS technology. Sensors and Actuators B, 1990, 1: 441
- [4] Baltes H, Brand O. CMOS-based microsensors and packaging. Sensors Actuators A, 2001, 92: 1
- [5] Rittersma Z M. Recent achievements in miniaturized humidity sensors——a review of transduction. Sensors and Actuators A, 2002, 96: 196
- [6] Chen J D, Liu Z Y. Dielectric physics. Beijing: Mechanical Industry Press, 1982(in Chinese)[陈季丹, 刘子玉. 电介质物理学. 北京: 机械工业出版社, 1982]
- [7] Chen G T. Engineer thermodynamics engineering. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1998(in Chinese)[陈贵堂. 工程热力学. 北京: 北京理工大学出版社, 1998]
- [8] Xiong X, Song C L, Zhong Y L. Surface physics. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1985(in Chinese)[熊欣, 宋常力, 仲玉林. 表面物理. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1985]

A Novel Humidity Sensor Compatible with CMOS Technology

Gu Lei, Huang Qing'an, Qin Ming, Zhang Zhongping and Yan Xianwei

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

Abstract: A new comb structure of capacitive humidity sensor is described, which is fabricated by a standard CMOS process to achieve an effective solution for accurate and reliable humidity measurement. The structure is analyzed by using the Coventor software. The capacitance of RH sensor is measured and the processes of absorption and desorption are compared clearly. The measured results show that the hysteresis, repeated property, and the sensitivity of the sensor can be precisely calibrated. The result indicates also that the novel humidity sensor may be applied in practice.

Key words: humidity sensor; MEMS; CMOS; integrated sensor

EEACC: 2575; 7230

Article ID: 0253-4177(2004)02-0174-05

Gu Lei male, was born in 1980, master candidate. His interests focus on integrated humidity sensors by CMOS IC technology.

Huang Qing'an male, was born in 1963, professor, advisor of PhD candidates. His research interests include MEMS and microelectronics.

Qin Ming male, was born in 1967, professor. His research interests include MEMS and microelectronics.

Received 13 February 2003, revised manuscript received 29 May 2003

©2004 The Chinese Institute of Electronics