

CMOS 兼容电容型湿度传感器的理论模型^{*}

陈军宁¹ 于峰崎² 王 阳¹ 柯导明¹

(1 安徽大学电子系, 合肥 230039)

(2 苏州中科集成电路设计中心, 苏州 215021)

摘要: 对一种与 CMOS 工艺兼容的电容型湿度传感器进行了理论推导, 物理建模和模拟仿真. 该湿度传感器是采用梳状铝电极结构, 聚酰亚胺作为感湿介质. 通过分析感湿介质的介电常数吸附水分后的变化, 考虑其电场分布, 对电容型湿度传感器的理论模型进行了研究和模拟. 利用 Matlab 软件对理论模型进行仿真, 结果表明所建模型比通常采用的 Laconte 模型更符合实验结果.

关键词: 湿度传感器; 电容; 介电常数; 聚酰亚胺; 灵敏度

EEACC: 7230

中图分类号: TP212 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)07-1374-05

1 引言

湿度传感器是一类重要的传感器, 在仓储、工业生产、过程控制、环境监测、气象等方面有着广泛的应用, 因此国内外研究十分活跃. 近年来, 对于湿度传感器模型的研究越来越受到重视, 因为只有对正确的传感器模型进行分析和仿真, 才可能使后期的工艺加工正常进行.

湿度传感器按照其测量的原理, 一般可分为电容型、电阻型、离子敏型、光强型、声表面波型等. 在不同的湿度传感器中, 电容型湿度传感器 (CHS) 由于感应相对湿度的范围大, 并且结构较简单, 生产过程较容易, 因此对它的研究受到了广泛重视^[1,2].

本文研究的电容型湿度传感器是采用梳状铝电极结构, 聚酰亚胺作为感湿介质. 它的优点主要是可与 CMOS 工艺相兼容, 容易利用成熟的标准 CMOS 工艺来加工, 且后加工工艺较简单. 对于这种湿度传感器进行物理建模的过程中, 已有的模型^[3,4] 存在仿真结果与实验结果相差很大的问题. 针对该问题, 我们从一个新角度着手, 对这种可与 CMOS 工艺兼

容的电容型湿度传感器进行了理论推导、物理建模, 并且对该模型进行了计算. 利用 Matlab 软件对所建理论模型进行了仿真, 结果表明, 所建的模型比常用的模型-Laconte 模型^[4] 更符合实验结果.

2 电容型湿度传感器物理结构与模型

电容型湿度传感器的工作原理是: 传感器上的感湿介质由于外界环境的相对湿度变化, 吸附/脱附空气中的水汽分子, 使得感湿介质的介电常数发生变化, 引起湿度传感器的电容值改变, 从而测量湿度. 电容型湿度传感器的结构如图 1 和图 2 所示. 铝电极板分别是由宽为 $2s$, 厚为 t , 长为 L 的条形铝电极形成的梳状结构, 相邻铝电极板的间距为 $2g$. p 型硅衬底的介电常数为 ϵ_1 , 厚度是 h_1 ; 在铝电极板的下方和硅衬底之间是二氧化硅层, 其介电常数为 ϵ_2 , 厚度是 h_2 ($h_1 \gg h_2$); 最上方覆盖着一层厚度是 h_3 的聚酰亚胺 (PI), 其介电常数是 ϵ_3 , 它随外界环境相对湿度的变化而变化.

该结构具有以下优点: (1) 可完全与标准的

^{*} 国家高技术研究发展计划资助项目 (批准号: 2002AA404010)

陈军宁 男, 1953 年出生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域有 VLSI 系统与设计、MEMS 设计、深亚微米 MOS 器件物理等.

于峰崎 男, 1962 年出生, 研究员, 主要研究领域有无线通信芯片设计、CMOS 传感器等.

王 阳 女, 1980 年出生, 硕士研究生, 主要研究领域有射频电路设计、CMOS 兼容电容型湿度传感器等.

2004-11-14 收到, 2005-01-14 定稿

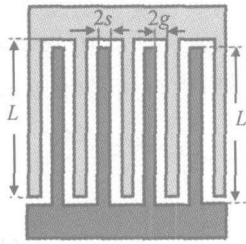


图 1 电容型湿度传感器的俯视图

Fig. 1 Top view of capacitive humidity sensor

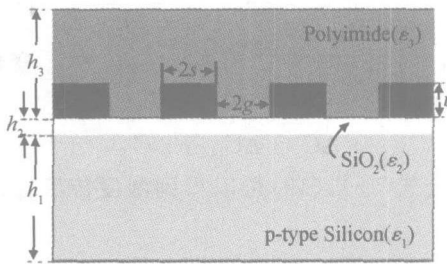


图 2 电容型湿度传感器的剖面图

Fig. 2 Sectional view of capacitive humidity sensor

CMOS 工艺兼容,不需进行任何工艺改动,便于利用成熟的 CMOS 工艺加工生产;(2)利用聚酰亚胺作为感湿膜,后端工艺较为简单,可以降低成本,便于大量生产;(3)采用铝电极梳状并联结构可以增加敏感电容,提高传感器的灵敏度;(4)可将硅衬底接地消除外界干扰,减小寄生电容。

3 理论推导与计算

根据 Looyenga 经验公式^[3],吸附水分的 PI 的介电常数为:

$$s = [(\frac{1}{w} - \frac{1}{p}) + \frac{1}{p}]^3 \quad (1)$$

式中 w 为 PI 吸附水的体积百分数,与相对湿度 x 的关系为:

$$w = w_m \phi(T) x^{(n)}$$

w_m 为 $T = 298 \text{ K}$ 时最大的体积百分数; $\phi(\cdot)$ 代表吸附系数对 w 的影响; (\cdot) 代表水的介电常数和催化效应对 w 的影响; p 为 $x = 0$ 时,PI 的介电常数; w 为水的介电常数,可由下式给出:

$$w = 78.54 \times [1 - 4.6 \times 10^{-4} (T - T_0) + 8.8 \times 10^{-6} (T - T_0)^2] \quad (3)$$

其中 $T_0 = 298 \text{ K}$ 。

为方便起见,在讨论如图 2 所示的三层结构之前,我们首先考虑只有一层衬底的梳状电极在衬底

内部所形成的电容,假设金属铝电极板的厚度很小,即 $t \rightarrow 0$,衬底的厚度为 h ,介电常数为 ϵ ,如图 3 所示。

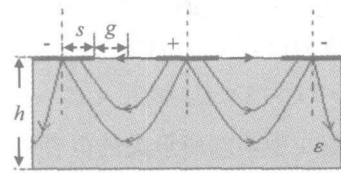


图 3 一层衬底的结构模型和电力线在其内部的分布

Fig. 3 Single-substrate CHS model and electric field distribution inside the substrate

由参考文献[5]得到:

$$C = \frac{1}{2} \epsilon_0 \times \frac{K(k)}{K(k')} L \quad (4)$$

其中 ϵ_0 为真空中的介电常数; L 为铝电极的长度; $K(\cdot)$ 为第一类椭圆积分; k, k' 为第一类椭圆积分的模数,它们可表示如下:

$$k = \frac{\sinh(\frac{s}{2h})}{\sinh(\frac{(s+g)}{2h})} \times \frac{\sqrt{\cosh^2(\frac{(s+g)}{2h}) + \sinh^2(\frac{(s+g)}{2h})}}{\sqrt{\cosh^2(\frac{s}{2h}) + \sinh^2(\frac{(s+g)}{2h})}} \quad (5)$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2} \quad (6)$$

将以上结果应用于三层结构的电容型湿度传感器中,电力线分布如图 4 所示。

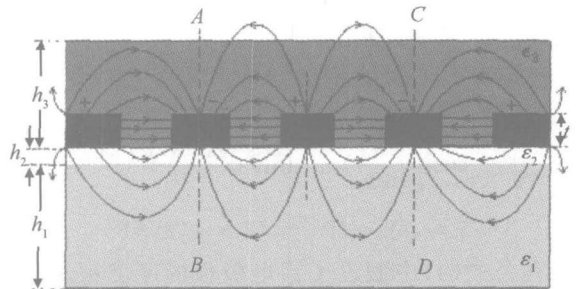


图 4 电容型湿度传感器的电力线图

Fig. 4 Electric field distribution of CHS

图 4 所示的 n 根条形铝电极组成的梳状结构中,除去两端的各 1.5 根电极外,在 AB 和 CD 之间共有 $(n - 3)$ 个相同的电极。利用保角映射^[6,7]的方法分别将在各个区域的部分电容映射到同一个平面中相同矩形的内部区域里,这样对于总电容的求解就相当于部分电容之和,也就等价于将部分电容并

联起来形成一个合成的电容,所以总电容 C_{11} 被认为是 4 个部分电容之和:(1)空气中的电力线形成的电容 C_0 ;(2)Si 衬底中的电力线形成的电容 C_1 ;(3)SiO₂ 层中的电力线形成的电容 C_2 ;(4)PI 覆盖层中的电力线形成的电容 C_3 . 所以

$$C_{11} = (n - 3)(C_0 + C_1 + C_2 + C_3)L \quad (7)$$

考虑到图 4 中两端所形成的电容和图 1 中铝电极的终端所形成的电容与总电容相比很小,将其忽略. C_0 表示由空气中的电力线所形成的电容,令 $h_0 = s$, 并考虑上下两个空气充满的空间,由公式(4)~(6)得到 C_0 的表达式:

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{K(k_0)}{K(k_0')} L \quad (8)$$

$$k_0 = \frac{s}{s+g}; \quad k_0' = \sqrt{1 - k_0^2}$$

同理 C_1, C_2, C_3 可以由公式(4)~(6)分别得到,这里的 h_1, h_2, h_3 分别是各层的厚度;它们的介电常数分别为 $\epsilon_1 - 1, \epsilon_2 - 1$ 和 $\epsilon_3 - 1$, 则公式(7)可以表示为:

$$C_{11} = (n - 3) \epsilon_0 \frac{K(k_0)}{K(k_0')} L \quad (9)$$

公式(9)中:

$$q_i = 1 + q_1 \frac{1 - 1}{2} + q_2 \frac{2 - 1}{2} + q_3 \frac{3 - 1}{2} \quad (10)$$

$$q_i = \frac{K(k_i) K(k_0)}{K(k_i') K(k_0')} \quad (11)$$

$$k_i = \frac{\sinh(\frac{s}{2h_i})}{\sinh(\frac{(s+g)}{2h_i})} \times \frac{\cosh^2(\frac{(s+g)}{2h_i}) + \sinh^2(\frac{(s+g)}{2h_i})}{\sqrt{\cosh^2(\frac{s}{2h_i}) + \sinh^2(\frac{(s+g)}{2h_i})}} \quad (12)$$

$$k_i = \sqrt{1 - k_i'^2} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (13)$$

在公式(4)中假设了铝电极板的厚度很小($t \rightarrow 0$),但实际情况下,金属电极板具有一定的厚度,所以在总电容中必须将此部分加入. 我们可以将铝电极之间的电力线形成的电容看成是平行板电容^[8], 由平行板电容器的公式得:

$$C_{22} = (n - 1) \epsilon_0 \frac{3tL}{2g} \quad (14)$$

所以图 4 所示的湿度传感器的总电容为:

$$C = C_{11} + C_{22} \quad (15)$$

至此我们推导出电容型湿度传感器的总电容.

另外湿度传感器的灵敏度也是设计时非常关注的问题^[4]. 在公式(10)中 ϵ_3 表示 PI 的介电常数,而吸附水分后的 PI 的介电常数用 ϵ_s 来表示,所以

$$q_3 = q_3 \frac{\epsilon_s}{2} \quad (16)$$

由公式(9)得:

$$C_{11} = (n - 3) \epsilon_0 \frac{K(k_0)}{K(k_0')} L \quad (17)$$

由公式(14)得:

$$C_{22} = (n - 1) \frac{\epsilon_0 \epsilon_s tL}{2g} \quad (18)$$

所以与吸附水分的 PI 的介电常数 ϵ_s 变化有关的总电容为:

$$C = C_{11} + C_{22} \quad (19)$$

由公式(15),(19)可以得到湿度传感器的灵敏度为:

$$S = \frac{C}{C} \times 100\% \quad (20)$$

4 仿真结果

由公式(1)~(3)得到吸附水分的聚酰亚胺介电常数 ϵ_s 随相对湿度的变化曲线,如图 5 所示. 其中可由文献[3]中的数据 and 公式(2)计算得出,计算中我们取 $\epsilon_p = 3.2, \epsilon_w = 78.45, T = 298 K$.

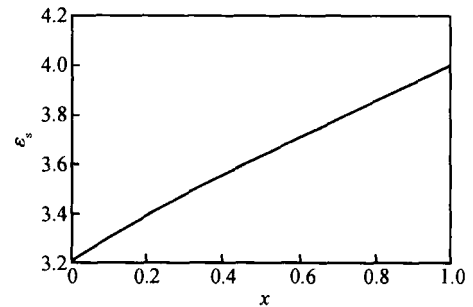


图 5 介电常数 ϵ_s 与相对湿度 x 的关系

Fig. 5 Dielectric constant ϵ_s versus relative humidity x

取 $n = 125$, 铝电极的宽 $2s = 2\mu m$, 相邻的铝电极的间距 $2g = 2\mu m$, 厚度 $t = 0.7\mu m$, 长 $L = 500\mu m$, 聚酰亚胺的厚度 $h_3 = 2.4\mu m, \epsilon_p = 3.2$, 利用上述所建模型,用 Matlab 软件进行仿真,得到总电容随相对湿度变化的曲线,如图 6 所示.

为便于与实验结果比较,取传感器面积为 $500\mu m \times 500\mu m$, 铝电极的宽和间距从 $1\mu m$ 变化到 $3\mu m, \epsilon_s = 3.5$ (当 $x = 0.4$ 时), 利用上述所建模型,

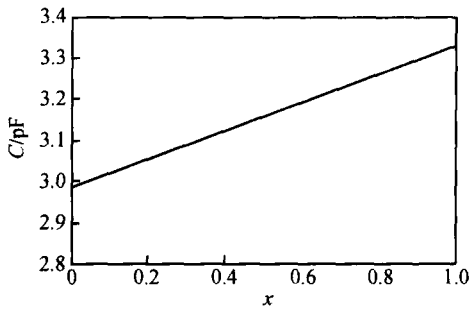


图 6 总电容 C 与相对湿度 x 的关系

Fig. 6 Total capacitance C versus relative humidity x

用 *Matlab* 软件进行仿真,得到总电容 C 的变化如图 7 所示.此外用 *Matlab* 软件对参考文献[4]的理论模型进行了仿真,仿真结果如图 7 所示.为便于比较,文献[4]的实验结果已在图 7 中画出,可以看出我们所建立模型的仿真结果比文献[4]中的理论结果更接近实验曲线.

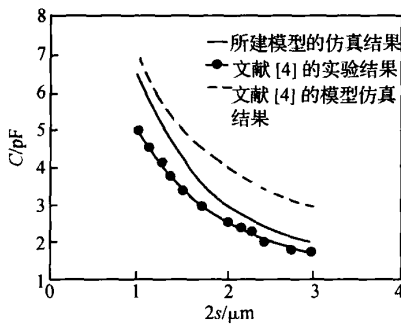


图 7 仿真结果与实验结果比较

Fig. 7 Comparison among simulation results and experimental result

图 7 表明所建模型的仿真结果与实验结果比较仍有一定的误差.这是因为如果不做模型简化,很难进行理论推导,从而也不可能对其进行仿真,因此我们在理论建模时做了如下的近似:(1)图 1 中铝电极的终端所形成的电容与总电容相比很小,所以在理论建模中将其忽略;(2)图 4 中两端所形成的电容与总电容相比很小,所以在理论建模中将其忽略;(3)在公式(12)中求解 k_1 时, h_1 应该为 $h_1 + h_2$,但是考虑到 p 型硅衬底的厚度 h_1 远大于二氧化硅层的厚度 h_2 ,所以我们在理论建模中使用 h_1 代替了 $h_1 + h_2$,这样可以减少其复杂性.同时在 CMOS 工艺、封装、后加工工艺中都会引入一定的误差,特别是对小尺寸器件来说,误差比较明显,所以在本文和参考文献[4]中都没有考虑电极宽度小于 $1\mu\text{m}$ 的情况.

当传感器面积为 $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ 时,铝电极的宽和间距从 $1\mu\text{m}$ 变化到 $3\mu\text{m}$,用 *Matlab* 软件对上述所建模型进行仿真,可得湿度传感器灵敏度的变化值如图 8 所示.在图 8 中,我们发现当传感器的面积一定时,铝电极的宽和间距越小,铝电极的根数越多,湿度传感器的灵敏度就越高.最后我们指出,本文是将聚酰亚胺作为感湿介质进行物理建模的,但此模型并不局限于该种感湿介质.

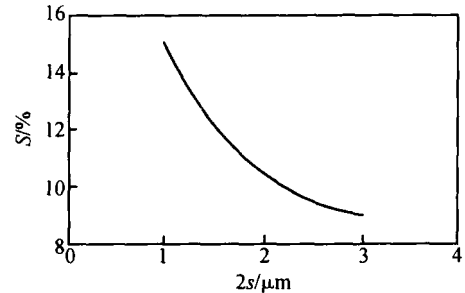


图 8 电容型湿度传感器的灵敏度与铝电极宽度的变化曲线

Fig. 8 CHS sensitivity versus Al electrode width

5 结论

本文对基于标准 CMOS 工艺的电容型湿度传感器进行了物理建模,在采用梳状铝电极结构的情况下,分析了湿度传感器的电场分布.我们从感湿介质的介电常数入手,研究了吸附水分后感湿介质的介电常数的变化,考虑在不同介质中电力线形成的电容,得到了电容型湿度传感器的总电容与相对湿度之间的关系.最后,我们利用 *Matlab* 软件对此模型进行了仿真,仿真结果与文献[4]的理论模型和实际测量值的比较显示,我们的电容型湿度传感器模型比文献[4]的理论模型更接近实验结果.

参考文献

[1] Qiu Y Y, Azeredo-Leme C, Alcacer L R, et al. A CMOS humidity sensor with on-chip calibration. *Sensors and Actuators*, 2001, 92(2) :80

[2] Gu Lei, Qin Ming, Huang Qing'an, et al. A novel humidity sensor compatible with CMOS technology. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(2) :174 (in Chinese) [顾磊, 秦明, 黄庆安, 等. 一种新型 CMOS 兼容湿度传感器. *半导体学报*, 2004, 25(2) :174]

[3] Shibata H, Ito M, Asakura M, et al. A digital hygrometer using a polyimide film relative humidity sensor. *Instrumentation and Measurement*, 1996, 45(2) :564

- [4] Laconte J , Wilmart V , Raskin J P , et al. Capacitive humidity sensor using a polyimide sensing film. *Design , Test , Integration and Packaging of MEMS/ MOEMS* ,2003 ,5 ~ 7 :223
- [5] Wu Hueydaw ,Zhang Zhihang ,Barnes F ,et al. Voltage tunable capacitors using high temperature superconductors and ferroelectrics. *Applied Superconductivity* ,1994 ,4(3) :156
- [6] Gevorgian S , Linner L J P , Kollberg E L. CAD models for shielded multilayered CPW. *Microwave Theory and Techniques* ,1995 ,43(4) :772
- [7] Cheng K K M ,Everard J K A. A new technique for the quasi-TEM analysis of conductor-backed coplanar wave-guide structures. *Microwave Theory and Techniques* ,1993 ,41(9) :1589
- [8] Mamishev A V ,Sundara-Rajan K ,Yang Fumin ,et al. Interdigital sensors and transducers. *Proceedings of the IEEE* ,2004 ,92(5) :808

A Theoretical Model for a Capacitive Humidity Sensor Compatible with CMOS Technology *

Chen Junning¹ , Yu Fengqi² , Wang Yang¹ , and Ke Daoming¹

(1 Department of Electronics , Anhui University , Hefei 230039 , China)

(2 Suzhou CAS IC Design Center , Suzhou 215021 , China)

Abstract : A capacitive humidity sensor compatible with CMOS technology is theoretically deduced. Its physical model is built and simulated. It uses comb electrodes and polyimide as moisture sensing material. The dielectric constant change of moisture sensing material due to absorption of water is analyzed. Based on the electric field distribution ,the theoretical model of the capacitive humidity sensor is analyzed. The Matlab simulation results show that our model is more in agreement with experiment results than Laconte 's model.

Key words : humidity sensor ; capacitor ; dielectric constant ; polyimide ; sensitivity

EEACC : 7230

Article ID : 0253-4177(2005)07-1374-05

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(No. 2002AA404010)

Chen Junning male ,was born in 1953 ,professor ,advisor of PhD candidates. His research interests include VLSI system and design ,MEMS design ,and ultra-submicron MOS device physics.

Yu Fengqi male ,was born in 1962 ,professor. His research interests include IC design for wireless communication applications and CMOS sensors.

Wang Yang female ,was born in 1980 ,master candidate. Her research interests include the design of RF circuit and capacitive humidity sensors compatible with the CMOS process.

Received 14 November 2004 ,revised manuscript received 14 January 2005