

集成电容式传感器边界电极的静电电容值分析

王 阳^{1,2}, 陈军宁¹, 柯导明¹

(1. 安徽大学电子科学与技术学院, 安徽合肥 230039; 2. 浙江万里学院电信学院, 浙江宁波 315100)

摘 要: 本文研究一种梳齿电极结构的集成电容式传感器, 利用保角变换对其边界电极的静电电容值情况进行推导, 给出了边界电极电容值的解析表达式, 并利用 Ansys 软件对其进行仿真验证. 结果显示解析公式得到的计算结果和软件仿真结果相吻合, 说明得到的公式具有高的精度. 利用所给的解析表达式可以为设计和应用该结构电容式传感器提供更好的理论基础.

关键词: 电容式传感器; 静电电容值; 边界电极; 保角变换

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 06-1410-04

Analysis of the Electrostatic Capacitance of an Integrated Capacitive Sensor's External Electrodes

WANG Yang^{1,2}, CHEN Jun-ning¹, KE Dao-ming¹

(1. Department of Electronic Science and Technology, Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China;

2. Department of Electronics and Information, Zhejiang Wanli University, Ningbo, Zhejiang 315100, China)

Abstract: An integrated capacitive sensor with comb electrodes is researched and the electrostatic capacitance of its external electrodes is analyzed using conformal transformation. The analysis expressions and physical model are built and simulated by Ansys. The calculation results based on the expressions are in agreement with the simulation results by Ansys. It shows that the theoretical model we have gotten is right. These expressions can be used in design and application of capacitive sensors with comb electrodes.

Key words: capacitive sensor; electrostatic capacitance; external electrodes; conformal transformation

1 引言

梳齿电极结构的电容被广泛的应用在微波集成器件、声表面波器件、压控电容器等领域. 近年来, 随着传感技术的快速发展, 基于以梳齿电极结构的集成电容式传感器, 因其具有与标准 CMOS 工艺兼容、灵敏度高、抗干扰能力强等优点, 受到国内外研究者的广泛关注. 因此, 针对该结构的电容式传感器建立完整的解析模型, 分析静电电容值构成, 有利于更好的应用该结构传感器.

1998 年 Gerwen 等人利用 $\nabla^2 \varphi = 0$ 和边界条件对梳齿电极结构的电容进行理论推导, 并将其应用到电容式生化传感器研究^[1]. 1999 年 Vendik 等人利用保角变换对该结构电容的电容值进行理论建模^[2]. 2002 年 Igreja 等人对梳齿电极结构气体传感器的电容量建立理论模型^[3]. 2005 年 Gevorgian 等人建立多层衬底结构的梳齿电容解析模型, 推导了电容值的解析表达式^[4]. 2003 年 Laconte^[5] 和 2008 年 Ghafar-Zadeh^[6] 等人利用在梳齿电极

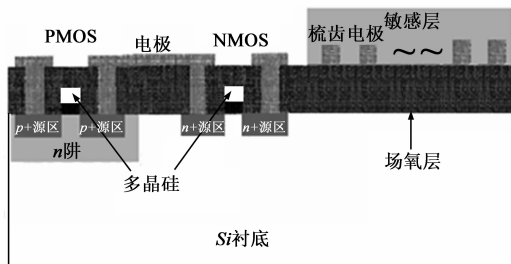
上覆盖敏感聚合物薄膜的方法制成湿度传感器, 得到理论值和实验结果.

从以上分析中看出, 针对梳齿电容和梳齿电极结构的电容式传感器研究人员做了大量研究. 但他们在电容值推导中大多是将边界电极电容值近似认为与内部电极电容值相等来计算的. 而对于电容式传感器, 其工作原理是利用电容值的变化以体现外界感知量的变化, 因此取值精确度要求较高, 若不单独考虑边界电极电容值, 所得的理论值与实际测量值之间会存在一定的误差, 影响结果分析. 本文就针对该结构电容式传感器边界电极的静电电容值情况进行分析, 推导解析表达式, 并利用 Ansys 有限元分析软件对其进行仿真, 以验证解析公式得到的计算结果与仿真结果的相符程度, 验证所建理论模型的正确性.

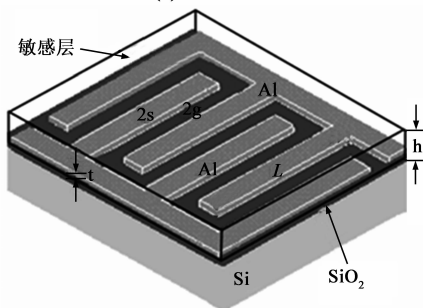
2 集成电容式传感器的物理结构

集成电容式传感器的结构如图 1 所示, 底层为硅, 硅层和电极之间为二氧化硅层, 电极板分别是由宽度

为 $2s$, 厚度为 t , 长度为 L 的条形铝电极组成, 并形成梳齿结构, 相邻电极之间的间距为 $2g$, 梳齿电极的总数为 n . 电极上的敏感层厚度为 h , 相对介电常数为 ϵ .



(a) 截面图



(b) 俯视图

图1 集成电容式传感器结构图

集成电容式传感器采用该结构的优点主要在于:

(1) 工艺简单, 便于利用标准的 CMOS 工艺加工生产, 降低成本. 电容式传感器前端工艺与 CMOS 工艺兼容, 在淀积金属层后, 刻蚀出梳齿电极, 在后处理工艺中形成敏感层; (2) 采用梳齿电极结构可以增加敏感电容值, 提高传感器的灵敏度; (3) 可以将硅衬底接地消除外界干扰, 减小寄生电容.

3 边界电极静电电容值的理论推导

首先分析梳齿电极在敏感层内部的电力线分布, 假设金属铝电极板的厚度很小, 即 $t \rightarrow 0$, 敏感层厚度为 h , 相对介电常数为 ϵ .

由图 2 可知, AB 与 CD 间的电容值可以看成电容 C_{b1} 和电容 C_{b2} 串联. 对于 AB 与 CD 间电容值的推导中, 只需推导 C_{b1} 的解析表达式, 再利用 s 将 C_{b1} 公式中的 $2s$ 替换, 即可得到 C_{b2} 的电容值. 最后利用两电容相串联, 可以得到 AB 与 CD 间的电容值, 推导出电容式传感器的边界电极静电电容值.

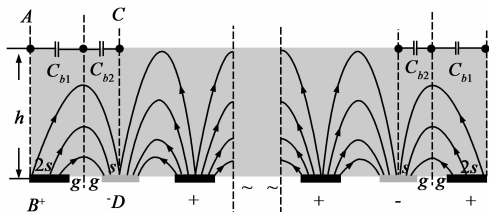
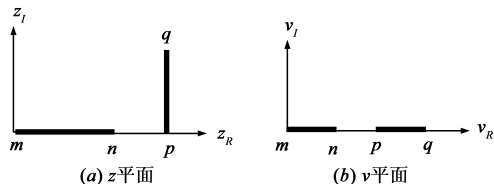


图2 梳齿电极在敏感层中的电力线分布图

利用保角变换对 C_{b1} 的静电电容值进行推导, 其原理是利用变换过程中电容的不变性, 把难于计算的复杂区域电容转变为平行板电容进行计算^[7]. 为了简便, 取 z 平面的第一象限进行分析.

图3 z 平面到 v 平面的映射转化图

由 z 平面知, $z_m = 0$, $z_n = 2s$, $z_p = 2s + g$, $z_q = (2s + g) + jh$. 利用保角映射将 z 平面变为 v 平面, 两者存在下式关系:

$$v = \text{sn}^2\left(\frac{K(a)}{2s + g} \cdot z, a\right) \quad (1)$$

式中, 函数 $\text{sn}(\cdot, \cdot)$ 为椭圆正弦, $K(\cdot)$ 为第一类完全椭圆积分, a 为模数, $a = r^2$.

利用公式(1), 得到 v 平面中各点值, $v_m = 0$, $v_n = \text{sn}^2(K(a) \cdot 2s / (2s + g), a)$, $v_p = 1$, $v_q = 1/a$, 如图 3(b) 所示.

为了便于计算, r 采用一种精度很高的近似式表达^[8].

$$r = \left[\frac{\exp\left(\frac{\pi \cdot (2s + g)}{h}\right) - 2}{\exp\left(\frac{\pi \cdot (2s + g)}{h}\right) + 2} \right]^2 \quad (2)$$

再利用分式线性映射, 将 v 平面变换为 t 平面, 两者存在下式关系:

$$t = \frac{b_1 v + b_2}{b_3 v + b_4} \quad (3)$$

b_1, b_2, b_3, b_4 为复常数.

由 m, n, q 点的对应关系知,

$t_m = 0$, $t_n \rightarrow \infty$, $t_q = 1$, 如图 4

所示, 公式(3)变化为:

$$t = \frac{(v_q - v_n) \cdot v}{(v - v_n) \cdot v_q} \quad (4)$$

对于 p 点, 当 $v_p = 1$ 时, $t_p = 1/k^2$, 代入公式(4)中, 可以得到:

$$k = \sqrt{\frac{(1 - v_n) \cdot v_q}{v_q - v_n}} \quad (5)$$

利用施瓦茨-克里斯托费尔变换, 将 t 平面变化为 w 平面, 在矩形的每个顶点偏转角都是 $+\pi/2$, 得到以下公式:

$$\frac{dw}{dt} = At^{1/2}(t-1)^{1/2}\left(t - \frac{1}{k^2}\right)^{1/2} \quad (6)$$

$$w = Ak \int \frac{dt}{\sqrt{t(1-t)(1-k^2t)}} + A_0 \quad (7)$$

令 $t = \xi^2$, 则:

$$w = 2Ak \int \frac{d\xi}{\sqrt{(1-\xi^2)(1-k^2\xi^2)}} + A_0 \quad (8)$$

常数 A, A_0 用来确定矩形的大小和方位, 取 $2Ak = 1, A_0 = 0$, 得到:

$$w = \int \frac{d\xi}{\sqrt{(1-\xi^2)(1-k^2\xi^2)}} \quad (9)$$

在 q 点时, $t_q = 1$, 取 $\xi = 1$, 可以得到 w_q 的值为:

$$w_q = \int_0^1 \frac{d\xi}{\sqrt{(1-\xi^2)(1-k^2\xi^2)}} = K(k) \quad (10)$$

在 p 点时, $t_p = 1/k^2$, 取 $\xi = 1/k$, 则:

$$\begin{aligned} w_p &= \int_0^{1/k} \frac{d\xi}{\sqrt{(1-\xi^2)(1-k^2\xi^2)}} \\ &= K(k) + \int_{1/k}^1 \frac{d\xi}{\sqrt{(1-\xi^2)(1-k^2\xi^2)}} \end{aligned} \quad (11)$$

利用积分变换, 并取 w 平面的上半平面, 可以得到:

$$w_p = K(k) + jK(k') \quad (12)$$

$$k' = \sqrt{\frac{v_n \cdot (v_q - 1)}{v_q - v_n}} \quad (13)$$

式中 k' 为 k 的余模数。

如图 5 所示, 根据保角变换中电容的不变性原则, 由平行板电容求解公式为:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \frac{S}{l} \quad (14)$$

S 为平行板电容的正对面积, l 为极板之间的距离, 可以得到 C_{b1} 的静电电容值为:

$$C_{b1} = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \frac{L \cdot K(k')}{K(k)} \quad (15)$$

再对 C_{b2} 的静电电容值进行推导, 取 z 平面的第一象限进行分析, 如图 6(a) 所示。

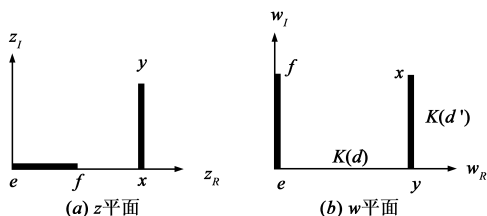


图6 映射转化图

在 z 平面中, $z_e = 0, z_f = s, z_x = s + g, z_y = (s + g) + jh$, 利用 z 平面的各点值和公式 (1) ~ (14), 可以得到 C_{b2} 的静电电容值为:

$$C_{b2} = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \frac{L \cdot K(d')}{K(d)} \quad (16)$$

$$d = \sqrt{\frac{(1-v_f) \cdot v_y}{v_y - v_f}} \quad (17)$$

$$d' = \sqrt{\frac{(v_y - 1) \cdot v_f}{v_y - v_f}} \quad (18)$$

式中 $K(\cdot)$ 为第一类完全椭圆积分, d 为模数, d' 是 d 的余模数。

因此, 利用 AB 与 CD 间的电容值为电容 C_{b1} 和电容 C_{b2} 串联, 得到梳齿电极结构的电容式传感器边界电极在敏感层中形成的电容 C_b 为:

$$C_b = \frac{C_{b1} \cdot C_{b2}}{C_{b1} + C_{b2}} \quad (19)$$

4 结果及讨论

利用 Ansys 有限元分析软件对电容式传感器的边界电极电容值进行仿真, 可以得到电场分布、电压分布和电容值等参数^[9]. 通过电荷密度分布可以模拟存储在电容器中的能量, 由公式 (20) 得到边界电极的电容值^[10]. W 是存储在梳齿电容中的能量, V_+ 和 V_- 分别是梳齿电容极板两端的电势。

$$C = \frac{2W}{(V_+ - V_-)^2} \quad (20)$$

Ansys 软件仿真模拟中选取梳齿电极宽度 $2s = 10 \mu\text{m}$, 间距 $2g = 10 \mu\text{m}$, 电极长度 $L = 5 \text{ mm}$. 为方便比较边界电极电容值的理论结果和仿真结果, 选择较大的敏感层介电常数值, 并仅考虑电极在敏感层中形成的电容. 若当梳齿电极总数 $n = 3$ 时, 从中间电极的 $1/2$ 处分析, 则相当于图 3 中两个 AB 与 CD 间电容的并联, 所得到的电容值正好等于传感器两边的边界电极电容值之和, 因此仿真中采用电极总数为 3。

图 7 中所示即为 $n = 3$ 时利用 Ansys 软件仿真得到的电场分布图. 利用公式 (20) 可以得到电容值的软件仿真结果, 如图 8 所示. 为了便于比较, 上述参数下理论数值的计算结果也已在图 8 中表示出。

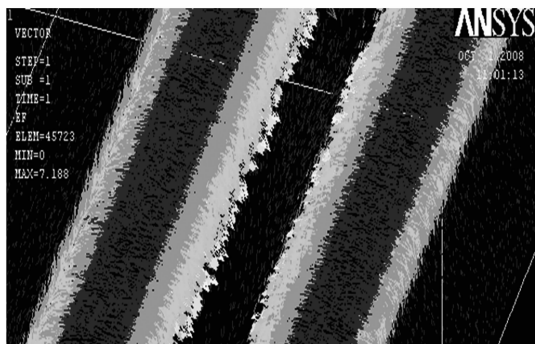


图7 $n=3$ 时电场分布图

图 8 表明, 当敏感层厚度较大时, 解析公式得到的数值计算结果和仿真结果相符, 说明得到的公式具有高的精度. 在敏感层厚度较小时, 计算结果与仿真结果之间存在一定的误差, 分析原因主要是由于在计算结

果中考虑金属电极板的厚度 $t \rightarrow 0$, 而在仿真模拟中厚度 t 虽然很小, 但并不为 0, 因此当敏感层厚度较小时, 仿真结果略大于计算结果。

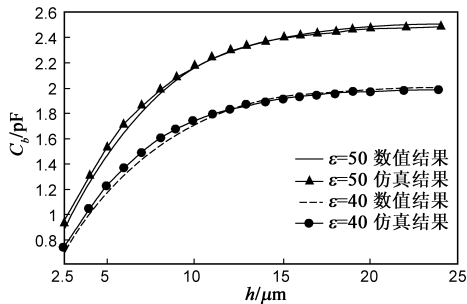


图8 C_s 与 h 的关系

由图 8 知, 随着敏感层厚度的增加, 边界电极的电容值也不断增大, 但是当敏感层厚度 $h \geq 2s + 2g = 20 \mu\text{m}$ 时, 电容值的变化量就非常微小了^[11]。因此当敏感层厚度大于电极宽度、间距之和时, 无需考虑在空气中电力线形成的边界电容值。但当 $h < 2s + 2g$ 时, 需将在空气层中的电力线形成的边界电容值计入公式 (15)、(16) 中。由参考文献 [4] 知:

$$C_{b1} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{air}} \cdot L \cdot \frac{K(k'_1)}{K(k_1)} + \epsilon_0 \cdot (\epsilon - \epsilon_{\text{air}}) \cdot L \cdot \frac{K(k'_2)}{K(k_2)} \quad (21)$$

$$C_{b2} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{air}} \cdot L \cdot \frac{K(d'_1)}{K(d_1)} + \epsilon_0 \cdot (\epsilon - \epsilon_{\text{air}}) \cdot L \cdot \frac{K(d'_2)}{K(d_2)} \quad (22)$$

利用公式 (19) 即可得到边界电极的电容值。公式 (21)、(22) 中 k_1 和 d_1 的求解中, 因为空气层的厚度无限, 因此 $h \rightarrow \infty$; k_2 和 d_2 的求解中, h 为敏感层的厚度; 空气的相对介电常数 $\epsilon_{\text{air}} = 1$ 。

5 结论

由于电容式传感器的感测原理决定对电容取值的精确度要求较高, 因此, 本文利用保角变换对其边界电极的静电电容值情况进行推导, 建立解析模型。在相同参数下, 由 Ansys 软件模拟得到的仿真结果与计算结果相吻合, 表明给出的解析公式结果精确。利用本文所给的解析表达式便于实际人员设计和模拟使用, 为应用该结构电容式传感器提供更好的理论基础。

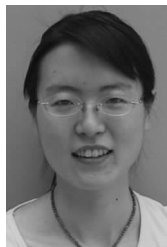
参考文献:

- [1] Gerwen P V, Laureyn W, Laureys W, et al. Nanoscaled interdigitated electrode arrays for biochemical sensors[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1998, 49(1-2): 73 - 80.
- [2] Vendik O G, Zubko S P, Nikol'skii M A. Modeling and calculation of the capacitance of a planar capacitor containing a ferroelectric thin film[J]. Technical Physics, 1999, 44: 349 - 355.
- [3] Igreja R, Marat-Mendes J N, Dias C J. Dielectric characterization of PEBA and PDMS for capacitive interdigital vapour sen-

sors[A]. 11th International Symposium on Electrets[C]. Piscataway, N. J.: IEEE Press, 2002. 283 - 286.

- [4] Gevorgian S, Abadei S. Analytic approximations for multilayer substrate coplanar-plate capacitors[A]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest [C]. Piscataway, N. J.: IEEE Press, 2005. 3. 1435 - 1438.
- [5] Laconte J, Wilmart V, Raskin J P, et al. Capacitive humidity sensor using a polyimide sensing film[A]. Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS[C]. Piscataway, N. J.: IEEE Press, 2003. 223 - 228.
- [6] Ghafar-Zadeh E, Sawan M, Theriault D. A 0.18-um CMOS capacitive sensor lab-on-chip[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 141(2): 454 - 462.
- [7] 拉夫连季耶夫 M A, 沙巴特 B B. 复变函数论方法[M]. 施祥林, 等, 译. 北京: 高等教育出版社, 2006. 1.
- [8] Akan V, Yazgan E. Quasi-static solutions of multilayer elliptical, cylindrical coplanar striplines and multilayer coplanar striplines with finite dielectric dimensions-asymmetrical case[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(12): 3681 - 3686.
- [9] 董林玺, 颜海霞, 钱■, 等. 倾斜梳齿的 MEMS 电容式传感器惯性脉冲响应特性研究[J]. 电子学报, 2008, 36(5): 1035 - 1040.
- Dong Lin-xi, Yan Hai-xia, Qian Xian, et al. Study of inertial pulse response of MEMS capacitive accelerometer with non-parallel combs[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(5): 1035 - 1040. (in Chinese)
- [10] 彭韶华, 黄庆安, 秦明, 等. CMOS 工艺兼容的单片集成湿度传感器[J]. 半导体学报, 2006, 27(2): 358 - 362.
- Peng Shaohua, Huang Qing'an, Qin Ming, et al. Research on CMOS compatible integrated humidity sensors[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(2): 358 - 362. (in Chinese)
- [11] Kidner N J, Homrighaus Z J, Mason T O, et al. Modeling interdigital electrode structures for the dielectric characterization of electroceramic thin films[J]. Thin Solid Films, 2006, 496(2): 539 - 545.

作者简介:



王 阳 女, 讲师, 1980 年出生于安徽, 现为安徽大学电子科学与技术学院博士研究生, 主要研究领域有集成传感器、射频电路设计等。

陈军宁 男, 教授, 博士生导师, 1953 年出生于安徽, 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。(本文通信作者) E-mail: jnchen@ahu.edu.cn

