

Design and Fabrication of a Piezoresistive Humidity Sensor Based on MEMS Technology *

SUN Hui-ming^{1,2}, ZHANG Xiao-duo¹, WU Jian¹, QIN Ming^{1*}, HUANG Qing-an¹

1. Key Laboratory of MEMS of Ministry of Education, Nanjing 210096, China;
2. HLJ Province Key Lab of Senior-Education for Electronic Engineering (HLJ University), Harbin 150080, China

Abstract: This paper presents a bimorphic piezoresistive humidity sensor fabricated by using SOI (Silicon on insulator) that is formed by silicon-silicon direct bonding. Its operation relies on the bimorphic bending of a polymer-coated diaphragm as a result of the humidity-induced swelling of the polyimide. In order to determine the structure of the sensor and to optimize the parameters, ANSYS software is used for the simulations. The fabrication processes were designed based on the simulation results. The sensitivity of the fabricated humidity sensor is 0.21 mV %RH, and the maximum hysteresis is about 8 %RH.

Key words: MEMS; humidity sensor; piezoresistor; polyimide

EEACC:7230;7320Z

基于 MEMS 工艺的压阻式湿度传感器的设计制作 *

孙慧明^{1,2}, 张筱朵¹, 吴 剑¹, 秦 明^{1*}, 黄庆安¹

1. 东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096;
2. 电子工程黑龙江省高校重点实验室, 哈尔滨 150080

摘 要: 提出用硅-硅直接键合的 SOI 片制作压阻式湿度传感器。它是利用涂覆在硅膜上聚酰亚胺膜吸湿发生膨胀, 导致双膜结构发生弯曲产生应力的原理进行工作的。为了确定传感器结构、优化尺寸, 采用 ANSYS 软件进行了模拟计算, 设计了 MEMS 湿度传感器的制造工艺, 对制作的微湿度传感器进行了测试, 其灵敏度为 0.21 mV %RH, 最大湿滞为 8 %RH。

关键词: MEMS; 湿度传感器; 压阻; 聚酰亚胺

中图分类号: TN4; TP 212

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)05-0769-04

随着 CMOS-MEMS 技术的不断成熟, 各式各样的微传感器、微执行器, 已成功地应用于测控系统, 最终实现“片上系统”。因此在用 MEMS 工艺制作微传感器时要考虑与制作电路的 CMOS 工艺兼容。目前的 MEMS 湿度传感器多是电容型, 电容型湿度传感器灵敏度高、功耗低、温漂小, 且易于 CMOS 工艺兼容, 但是它的缺点是传感器直接暴露于待测环境中, 影响器件的长期稳定性和可靠性, 不利于易燃易爆恶劣环境下测量。本设计是一种压阻式的湿度传感器, 它从物理上将机械和电子的传感结构分开, 从而防止了吸湿部件和电子部件之间的交叉耦合, 可用于易燃易爆等恶劣环境下的湿度测量。

本文利用硅与聚酰亚胺两种材料的膨胀系数不同, 聚酰亚胺膜吸湿发生膨胀, 使聚酰亚胺和硅膜构成的双膜结构发生弯曲产生应力, 由压阻进行测量。为了确定传感器结构, 优化传感器尺寸, 用 ANSYS 软件进行了模拟。并设计了湿度传感器的制造工艺, 采用硅-硅直接键合的 SOI 片、硅自停止技术 [1] 有效地控制了硅膜的厚度。

1 传感器结构与模拟仿真

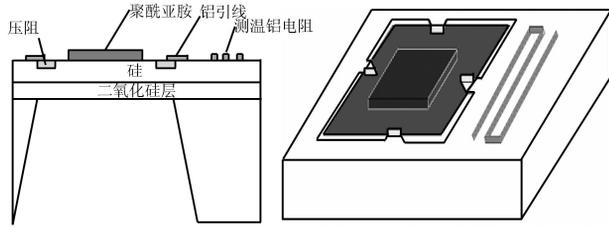
1.1 传感器结构

聚酰亚胺具有吸湿体积发生膨胀的特性, 这种特性是可逆的, 且水分子对硅的体积基本上没有影响。

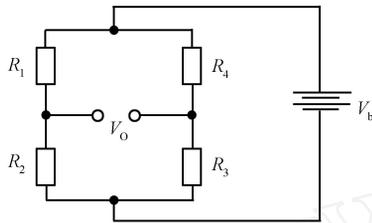
基金项目: 国家 863 计划资助课题 (2006AA040104); 江苏省青蓝工程人才培养基金资助课题

收稿日期: 2007-07-27 修改日期: 2007-09-11

利用硅与聚酰亚胺的双膜结构,两种材料吸湿膨胀系数不同,从而使双膜发生弯曲变形,产生应力。在一定的湿度变化条件下,会有不同应力的产生。通过测量硅膜上的应力,即可得到相应的湿度变化。对应力的变化用四个联成惠斯通电桥形式的压阻进行测量,如图1(c)。



(a) 传感器的横截面示意图 (b) 传感器的结构示意图



(c) 湿敏压阻连接方式

图1 湿度传感器的结构示意图

湿度传感器的基本结构示意图如图1所示,在类似于普通压阻式压力传感器结构膜上旋涂一层聚酰亚胺吸湿层,形成湿度敏感的双层复合膜结构。由于聚酰亚胺是由聚酰亚胺酸在高温下亚胺化形成的,从聚酰亚胺酸到聚酰亚胺时,它的体积会缩小,而硅膜的体积是不变的,因此会使膜向下弯曲产生应力,此应力就是常温下聚酰亚胺层上的机械残余应力 ρ_{ol} ,也是相对湿度为零时的初始应力。当湿度增加时,聚酰亚胺吸湿发生膨胀,会减少薄膜向下弯曲的程度。这时桥路输出电压 V_p 为:

$$V_p =$$

$$\frac{(R_1 + R_1)(R_3 + R_3) - (R_2 + R_2)(R_4 + R_4)}{(R_1 + R_1 + R_3 + R_3)(R_2 + R_2 + R_4 + R_4)} V_B \quad (1)$$

式中: V_B 为电源电压, R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 为扩散形成的四个桥臂电阻。 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 分别为湿度变化引起的桥臂电阻变化量。若 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, $R_1 = R_3 = R$, $R_2 = R_4 = -R$ 那么上式可以简化为:

$$V_p = \left| \frac{-R}{R} \right| V_B \quad (2)$$

由压阻效应可得^[2]:

$$\frac{-R}{R} = \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (3)$$

由此可知,要提高灵敏度就要使压阻系数和膜片的应力最大,在压力敏感器件的设计中,从制作硅杯

工艺考虑,选择方形膜结构用各向异性腐蚀的方法制作。硅材料选择(100)晶面。在(100)晶面上 110 和 $\bar{1}10$ 晶向电阻的压阻系数最大,是 $\frac{1}{2} \epsilon_{44}$,

$\frac{1}{2} \epsilon_{44}$ 。在常温下, $\epsilon_{44} = 138.1 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{N}$ 。可满足

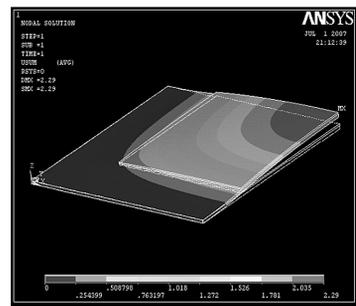
$$R_1 = R_3 = R, R_2 = R_4 = -R。$$

应力是由聚酰亚胺膜吸湿而产生的,由于是三维结构,难于用理论推出应力分布情况,借助于 ANSYS 软件进行模拟分析。

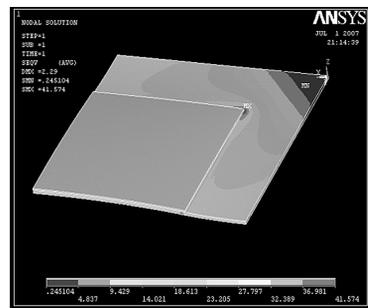
1.2 应力模拟仿真

对于膜片上应力分布用 ANSYS 软件进行分析。由于 ANSYS 没有湿度这一负载,而相对湿度引起膨胀与温度引起膨胀的原理类似,因此将湿度膨胀系数类比成热膨胀系数进行模拟仿真,增加多少相对湿度就相当于增加多少温度^[3]。

用 ANSYS 对复合膜结构建模参数选取如下^[4-5]:硅膜尺寸: 1500×1500 ;硅膜厚度 d_{si} : 10;聚酰亚胺膜与硅膜的比例系数: $x = 0.7$;聚酰亚胺厚度 d_{pol} : 5;聚酰亚胺残余应力 ρ_{ol} : 0。因为是对称结构所以只取四分之一模拟,图2是在相对湿度为 60%RH 时的模拟结果;表1是不同湿度下双膜结构的中心最大位移、边缘最大应力。由此可见,正方形膜应力最大处在硅膜四个周边中心处,压阻可以设计在此。应力最大在聚酰亚胺膜的四顶角处,在正方形膜的四周边中心处应力和湿度是线性关系,最大应力可达 50 MPa 左右。



(a) 在 60% RH 挠度分布图



(b) 在 60% RH 应力分布图

图2 双膜结构在 60% RH 的挠度、应力分布云图

表 1 在不同湿度下中心最大位移、最大应力

%RH	20	40	60	80	100
Displacement / μm	0.763197	1.526	2.29	3.053	3.816
Edge stress / MPa	9.561	20.534	28.684	38.246	47.807
Max stress / MPa	13.858	27.716	41.574	55.431	69.289

Buchhold 对双膜结构进行了多次模拟,并利用非线性回归算法拟合给出了压阻区应力的关系式^[6-7]:

$$\text{Res}(\varphi) = \sigma_x - \sigma_y = \text{Res}_{,0} + \text{Res}(\varphi) \quad (4)$$

$$\text{Res}_{,0} = c_1 x(1 + c_2 x) \frac{d_{pol}}{d_{Si}} \left[1 - c_3 \frac{a}{d_{Si}} \right]_{pol} \quad (5)$$

$$\text{Res}(\varphi) = c_4 x(1 + c_5 x) \frac{d_{pol}}{d_{Si}} \left[1 - c_5 \frac{a}{d_{Si}} \right]_{pol} L \quad (6)$$

其中: φ 表示相对湿度; $\text{Res}(\varphi)$, $\text{Res}_{,0}(\varphi)$ 和 $\text{Res}(\varphi)$ 分别代表压阻区应力,相对湿度为 0 时压阻区的应力和相对湿度为 φ 时压阻区的应力变化量; σ_x 和 σ_y 则是压阻区的纵向应力和横向应力; $c_1 - c_6$ 为方程形状系数,通过非线性回归可求解; L 是湿度应力耦合因子。它只与聚酰亚胺的材料特性有关^[6], $L = \frac{E_{pol}}{1 - \nu_{pol}}$ 。由式(6)可以看出:传感器的灵敏度与聚酰亚胺膜厚成正比与硅膜厚度成反比;与聚酰亚胺膜的比例系数成正比与硅膜长度成反比;与聚酰亚胺的杨氏模量、吸湿膨胀系数成正比与泊松比成反比。综合考虑各种因素,选取: $\nu_{pol} = 1000$; $x = 0.8$; $d_{pol} = 5$; $d_{Si} = 10$ 。

1.3 输出与湿度关系的计算

传感器的输出若取开环恒流源供电,那么输出电压由式(2)得到式(7):

$$V_p = R \times I_0 = \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) R \times I_0 \quad (7)$$

考虑到应力不但是湿度的函数也是温度函数,于是式(4)可表示为式(8):

$$\text{Res}(\varphi, T) = \sigma_x - \sigma_y = \text{Res}_{,0} + \text{Res}(\varphi, T) \quad (8)$$

式(7)可表示为式(9):

$$V_p = \frac{1}{2} I_0 R \text{Res}_{,0} + \frac{1}{2} I_0 R \text{Res}(\varphi, T) = U_0 + U(\varphi, T) \quad (9)$$

通过非线性回归求解方程形状系数。 $c_1 = 1.61$; $c_2 = 1.69$; $c_3 = 1.83 \times 10^{11}$; $c_4 = c_5 = 1.66$; $c_6 = 2.56 \times 10^{-11}$ 。代入公式得:

$$U(\varphi, T) = \frac{1}{2} I_0 R \text{Res}(\varphi, T) =$$

$$\frac{1}{2} I_0 R \times 1.66 x(1 + 1.66 x) \frac{d_{pol}}{d_{Si}} (1 - 2.56 \times 10^{-11}$$

$$\frac{a}{d_{Si}})_{pol} (L + L_T T)$$

其中: U_0 定义为偏移电压,它只是聚酰亚胺残余应力 σ_{pol} 的函数与湿度无关, $U(\varphi, T)$ 为温、湿度引起的电压变化量。根据公式(8)、(9)和(10)以及已确定的器件参数和具体几何尺寸,并设桥臂电阻为 3 k Ω ,恒流源电流为 1 mA,即可获得输出电压 V_p 与湿度 φ 之间的关系曲线图 3。

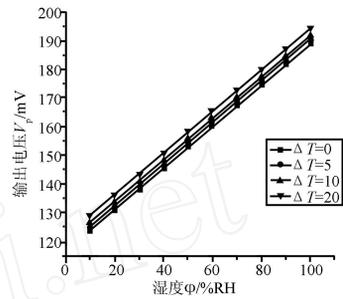


图 3 输出电压与湿度的关系图

压阻电桥的相对湿度灵敏度为:

$$S = \frac{dV_p}{d\varphi} = \frac{dU(\varphi, T)}{d\varphi} = \frac{1}{2} I_0 R \frac{d \text{Res}(\varphi, T)}{d\varphi} =$$

$$\frac{1}{2} I_0 R S = \frac{1}{2} \times 138.1 \times 10^{-11} \times 3 \times 10^3 \times 10^{-3} \times 3.52212 \times 10^5 = 0.73 \text{ mV} / \%RH$$

聚酰亚胺在环境温度升高时,同样会发生膨胀,而且它的热膨胀系数可与吸湿膨胀系数相比拟,为此设计了一个温敏电阻可对湿度传感器进行温度补偿。由于铝的温度系数和铂相当,为 0.00429 K⁻¹,可用作测温电阻,不过铝的电阻率较小,为了获得较大的电阻值,将其设计成折形,铝的电阻率为 2.65 × 10⁻⁸ Ω·m,设计在室温下铝电阻条的阻值为 55 左右。

2 传感器制作工艺

压阻式湿度传感器采用硅-硅直接键合的 SOI 片、Si-SiO₂ 结构自停止腐蚀 MEMS 技术加工制作。先是利用直接键合工艺制作 SOI 片:选 4inch N 型 100 硅片,热氧化,预键合,退火。将一面减薄到 5~10 μm。制作压敏电阻:热氧化,光刻压敏电阻,硼扩散。背面腐蚀硅杯:淀积 Si₃N₄,背面干法光刻腐蚀窗口,用 KOH 腐蚀液 80 $^{\circ}$ C 腐蚀,到 SiO₂ 层腐蚀会自停止,去 Si₃N₄。硅膜片的厚度就是膜片减薄的厚度,可以有效地控制膜片的厚度。制作 Al 引线:氧化,刻引线孔,溅射 Al 厚度 1 μm,反刻 Al 引线,腐蚀 Al。制作聚酰亚胺膜:涂聚酰亚胺,光刻,亚胺化。

3 传感器测试结果

我们设计制作了压阻式湿度传感器,图5是由三维立体显微镜拍摄的压阻式湿度传感器正面图。图6是压阻式湿传感器背面腐蚀后,111以及SiO₂面自停止体腔图。

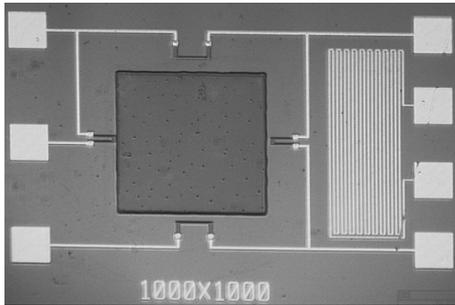


图5 压阻式湿度传感器正面图

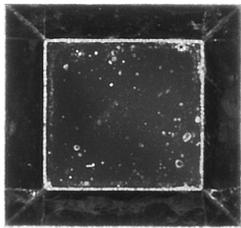


图6 压阻式湿传感器背面腐蚀后 111 以及 SiO₂ 面自停止体腔图

在室温下,测得四个压阻阻值分别为:3.046 k, 3.295 k, 3.099 k, 3.281 k。

采用用5种饱和盐溶液法对湿度传感器进行了测试。加上1 mA的电流进行不同湿度下的电压测量,得到的如图7所示的结果。

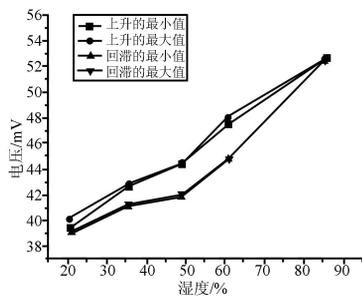


图7 不同湿度下输出电压

从图中可以可得到电压灵敏度:

$$S = \frac{52.6 - 39.1}{85.5 - 20.6} = 0.208 \text{ mV} / \%RH$$

从图中还可以看出,升湿和降湿曲线并不重合,最大处电压相差 2.8 mV,湿滞约为 8 %RH。传感器输出与湿度基本满足线形关系,但灵敏度比设计的低,原因聚酰亚胺膜设计为 5 μm 但实际制作是 2 μm 左右。从实用角度,传感器的参数有待进一步设计,对双膜结构,残余应力对灵敏度有影响,应该考虑时效处理。温度对灵敏度的影响也不可忽略,要进行温度补偿。

4 结论

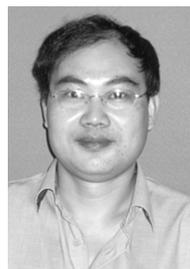
利用有限元法对硅与聚酰亚胺双膜结构的应力分布和压阻输出进行了模拟计算,并在此基础上设计、制造了 MEMS 压阻式湿度传感器,采用的硅-硅直接键合的 SOI 片、硅自停止技术能有效地控制了硅膜的厚度。对传感器进行了测试,其灵敏度为 0.208 mV %RH,湿滞为 8 %RH。

参考文献:

- [1] 黄庆安. 硅微机械加工技术[M]. 科学出版社,1996,155-229.
- [2] 孙以材,刘玉岭,孟庆浩. 压力传感器的设计制造与应用[M]. 冶金工业出版社,2000,31-70.
- [3] Gerlach G, Sager K. A Piezoresistive Humidity Sensor[J]. Sensors and Actuators 43, 1993, 181-184.
- [4] Gerlach G, Sager K, Schroth. A 1994 Simulation of a Humidity-Sensitive Double-Layer System[J]. Sensors and Actuators B 18-19, 1994, 303-307.
- [5] Sandmaier H, Piezoresistive Pressure Sensors Representing the 2nd Generation Avoid the Physical Limits Based on Conventional Designs[J], Micro System Technologies, 1990, 90:581-586.
- [6] Buchhold R, Nakladal A, Gerlach G and Neumann P, Design Studies of Piezoresistive Humidity Sensors[J]. Sensors and Actuators,1998,53: 1-7.
- [7] Buchhold R, Nakladal A, Sager K, Gerlach G, Sahre K, Muller M and Eichhorn KJ, Reduction of Stress in Micromachined Components Caused by Humidity-Induced Volume Expansion of Polymer Layers[C]// Proc. MICROMAT '97,1997.



孙慧明(1954-),女,研究员,2006年国内访问学者,从事微电子学与微传感器研究工作,sunhm2001@yahoo.com.cn



秦明(1967-),男,东南大学电子科学与技术学院教授,目前主要开展CMOS MEMS传感器的研究,mqin@seu.edu.cn