

CMOS 工艺兼容的温湿度传感器 *

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 工艺兼容的温湿度传感器, 讨论了感湿理论模型并用 COVENTOR 软件进行了模拟, 给出了具体的结构参数及工艺制作步骤, 最后对温湿度传感器进行了测量, 对理论值和实际测量值做了比较并给出了分析结果. 结果表明, 传感器在 25 °C 时的灵敏度为 0.015pF/%RH, 从 15%RH ~ 95%RH, 电容实际变化量为 1.23pF.

关键词: 温湿度传感器; 聚酰亚胺; 电容型

EEACC: 1220B; 2180B; 2575F

中图分类号: TP212.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)07-1428-06

1 引言

在工农业生产、气象、环保、国防、科研、航天等部门经常需要对环境温度和湿度进行测量. 随着科学技术的发展, 人们越来越重视湿度和温度的检测及控制并进行了大量的研究工作. 系统的微型化和集成化是未来传感器发展的方向^[1], 因此与使用两个独立的单功能传感器相比, 温湿度集成传感器有以下优点: (1) 能确保温度和湿度信息来源于被测环境中的同一个位置; (2) 减小了压焊块的数量, 有效地减小了芯片面积. 早在 1987 年 Yamamoto^[2] 利用硅温敏二极管和聚酰亚胺湿敏电容做成了集成温湿度传感器, 硅温敏二极管体积小, 测温准确, 便于集成. 聚酰亚胺高分子薄膜耐热、耐高温、介质稳定性好、耐化学腐蚀、温度系数小、长期稳定性好、与 CMOS 工艺完全兼容, 是一种比较理想的感湿介质^[3]. 而后 Lee^[4] 等人利用 MEMS 技术制造了悬臂梁结构的温湿度传感器, 他使用硅/氮化硅作为悬臂梁与衬底构成一个可变电容, 在悬臂梁上涂覆一层感湿介质聚酰亚胺, 利用感湿介质吸湿发生胀缩引起悬臂梁上下运动从而引起湿敏电容的变化, 并利

用铂电阻作为测温元件. 与 CMOS 工艺兼容的 MEMS 温湿度传感器具有体积小、价格低、产品一致性好的特点, 有较好的应用前景.

本文在前期 CMOS 湿度传感器研究的基础上^[5,6], 采用标准 CMOS 工艺加后道工序设计并制作了一个温湿度传感器, 对其进行了测试. 湿敏电容为平铺叉指结构, 采用铝电阻作为测温元件, 感湿介质采用上海交通大学化学系生产的 PF5 型聚酰亚胺. 结果表明, 本文 CMOS 工艺兼容的单片温湿度传感器在 10 ~ 34 °C 有较好的特性.

2 设计

2.1 温湿度传感器结构

温湿度传感器的截面结构如图 1 所示, 首先在衬底硅上热生长一层氧化层, 然后溅射铝并光刻腐蚀形成铝叉指电极和电阻条, 最后涂覆感湿介质聚酰亚胺. 图 2 是铝层的平面结构示意图, 将上下叉指电极间距适当放宽, 这样可以在叉指电极中布一根折线型铝电阻条, 利用铝的温度系数, 通过测量铝电阻的变化来测量环境温度. 当外界湿度变化, 感湿膜

* 国家高技术研究发展计划资助项目 (批准号: 2004AA404030)

彭韶华 男, 1981 年出生, 硕士研究生, 研究方向为 CMOS MEMS.

黄庆安 男, 1963 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事微电子教学和 MEMS 研究.

秦 明 男, 1967 年出生, 教授, 主要从事微电子和 MEMS 研究.

2004-10-23 收到, 2004-12-13 定稿

聚酰亚胺的介电常数发生改变,通过测量叉指电容值就可以得到对应的环境湿度.与三明治结构相比,平铺叉指电容结构有以下优点:(1)将叉指电极间距适当加大可以有效避免电击穿;(2)与标准 CMOS 工艺完全兼容,只需增加部分后序工艺,即聚酰亚胺的涂覆和亚胺化.

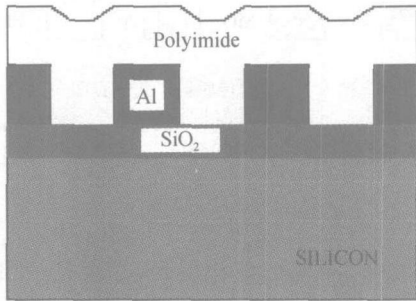


图 1 温湿度传感器截面图

Fig. 1 Cross-section of temperature and humidity sensor

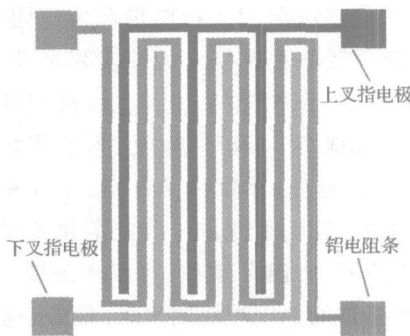


图 2 温湿度传感器平面结构图

Fig. 2 Schematic structure of temperature and humidity sensor

2.2 感湿模型及有限元模拟

在叉指电极和电阻条上覆盖一层感湿介质膜——聚酰亚胺,当外界环境中的相对湿度发生变化时,感湿层吸附或脱附空气中的水气分子,使得聚酰亚胺介电常数发生变化,从而引起叉指电容的改变.当环境湿度增大,介电常数上升,电容值变大.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.本文利用 Looyenga^[7]的半经验公式结合 Shibata 的有关固体吸收水分与环境相对湿度的关系式推导出电容式湿敏电容与相对湿度的关系. Looyenga 的有关聚合物和水的混合体系介电常数公式为:

$$= [V_2 (\frac{1}{2} - \frac{1}{1}) + \frac{1}{1}]^3 \quad (1)$$

式中 ϵ_1 和 ϵ_2 分别是聚合物和水的介电常数; V_2 是水在聚合物中的体积比. Schibata 等给出了固体吸收水分的经验公式^[8]:

$$V_2 = V_m \phi(T) x^{(T)} \quad (2)$$

其中 V_m 是在温度为 T_0 时固体所能吸附水汽的最大体积比; $x = \%RH/100$, $\phi(T)$ 代表吸附系数对温度的依赖程度,其表达式为:

$$\phi(T) = 1 - \epsilon_0 (T - T_0) \quad (3)$$

$\epsilon(T)$ 反映了水的介电常数以及触媒效应对温度的依赖程度,公式如下:

$$\epsilon(T) = \epsilon_0 \frac{1 - \epsilon_1 (T - T_0) + \epsilon_2 (T - T_2)^2}{1 + \epsilon_1 \exp[\epsilon_2 (T - T_0)]} \quad (4)$$

上式中 $V_m = 4.04 \times 10^{-2}$, $\epsilon_0 = 2.43 \times 10^{-3}$, $\epsilon_1 = 2.22 \times 10^{-4}$, $\epsilon_2 = 2.34 \times 10^{-5}$, $\epsilon_0 = 0.836$, $\epsilon_1 = 4.9 \times 10^{-3}$, $\epsilon_2 = -0.12$, 将上述数据代入公式(1),(2),(3),(4)整理得到当 $T = 298\text{K}$ 时,混合体的介电常数表达式为:

$$= [0.0404 x^{\frac{0.836}{1+0.0049}} (78.54^{\frac{1}{3}} - 3.2^{\frac{1}{3}}) + 3.2^{\frac{1}{3}}]^3 \quad (5)$$

(5)式给出了常温(298K)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%RH 变化到 100%RH 时,介电常数从 3.2 变化到 4.0.

在实际电容测量时,我们将上下叉指电极进行短接作为电容的一端,铝电阻条作为电容的另一端.这样做相当于把上叉指和铝电阻条组成的电容与下叉指和铝电阻条组成的电容进行并联连接,有效地增大了电容值.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:

$$C_{PI} = \frac{n l h_{finger}}{W_{gap}} + \frac{n l}{2} \quad (6)$$

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.根据上面所给出的温湿度传感器结构参数以及介电常数的变化范围可以计算出环境相对湿度从 0%RH 变化到 100%RH,电容变化的理论值为 6.86~8.59pF,变化量为 1.73pF.

本文使用 COVENTOR 软件对温湿度传感器进行了模拟.铝叉指电极和电阻条的总数是 133 根,如果将其全部进行模拟将会花费大量的时间,考虑到叉指电极和铝电阻条是传感器中的重复单元,因此选取两组重复单元进行模拟,图 3 给出了叉指电

极和电阻条之间电荷密度分布模拟图,通过电荷密度分布图可以计算出储存在电容器中的能量^[10],因此可以通过公式(7)来计算叉指电极和铝电阻条构成的电容器的电容.

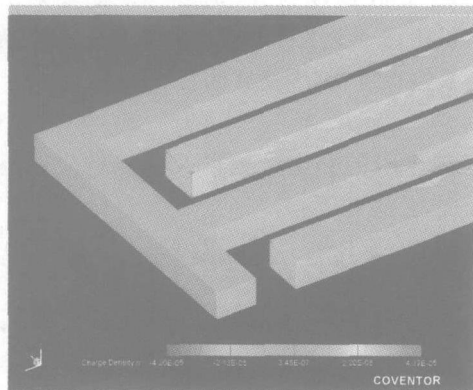


图 3 叉指结构电容电荷密度分布图

Fig. 3 Charge density distribution of the interdigital capacitance

$$C = \frac{2W}{(V_1 - V_2)^2} \quad (7)$$

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.

图 4 为利用 COVENTOR 分析得到的曲线,从图中可以看出敏感电容从 6.93pF 变化到 8.66pF,电容变化量为 1.73pF,这与上面给出的感湿模型符合得很好.

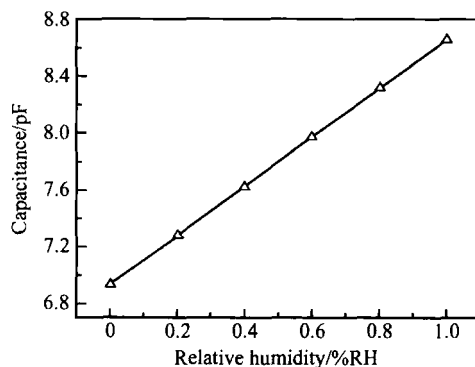


图 4 COVENTOR 模拟相对湿度与电容的关系曲线

Fig. 4 Capacitance versus RH by software COVENTOR simulation

3 温湿度传感器制备工艺

具体工艺流程如图 5 所示.

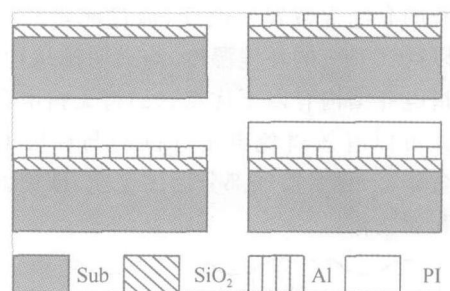


图 5 温湿度传感器工艺流程图

Fig. 5 Fabrication sequences of the humidity and temperature sensor

工艺步骤为:首先在氧化炉中利用干-湿-干法热生长一层 $1\mu\text{m}$ 厚的氧化层,这样生长的氧化层致密,与铝的黏附性较好.氧化层较厚的目的是可以有效降低衬底的寄生电容.然后利用电子束溅射一层 $1.5\mu\text{m}$ 厚的铝,铝的厚度不能太薄,太薄会使湿敏电容太小不利于检测,太厚光刻时会出现困难.对铝层利用湿法腐蚀法形成叉指电极和铝电阻条.接下来是用变速甩胶法在铝层上面涂覆聚酰亚胺酸,具体转速为 $2000\text{r}/\text{min}$ 保持 10s ,然后再把转速提高到 $3000\text{r}/\text{min}$ 保持 60s ,经这样涂覆的聚酰亚胺酸膜平整、无泡、光亮,厚度为 $2.5\mu\text{m}$.本实验所使用的聚酰亚胺酸是上海交通大学化学化工系出品的 PF5 型,不感光,常温存储型.所以还需要进行一次光刻,把传感器的铝压焊块刻出来.最后一步是亚胺化处理,这对湿度传感器来说也是最关键的一步,它将直接影响传感器的感湿性能.亚胺化过程是指通过一次高温热处理之后,使分子间进一步成环增大从而达到高分子聚酰亚胺所具有的吸湿脱湿性能.因为这个过程发生在固相中,需要较高的温度,一般需要 $200\sim 300^\circ\text{C}$,在此反应过程中所产生出来的缩聚水必须设法迅速排除,否则它会使反应逆向进行使聚酰亚胺又转变为聚酰亚胺酸,严重时产生水解断键.本文所采用的亚胺化条件为利用烤箱进行阶梯加热,具体加热参数为:从室温以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的加热速度升至 150°C ,在 150°C 处保温 30min ,然后从 150°C 以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度升至 250°C ,在 250°C 处保温 30min ,最后从 250°C 以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度升至 300°C ,在 300°C 处保温 60min .由于铝压焊块露在外面,亚胺化过程中铝容易高温氧化,所以亚胺化过程中在烤箱中以 $1\text{L}/\text{s}$ 通氮气,这样可以有效保护铝压焊块不被氧化.最后聚酰亚胺的厚度为 $2\mu\text{m}$.

4 实验结果

图 6 给出了温湿度传感器实物图的局部照片。照片显示铝叉指电极和电阻线条完整,没有出现断条、搭线现象。聚酰亚胺为半透明物质,覆盖在叉指电极上,其边界线条笔直,证明其光刻腐蚀良好。传感器的具体结构尺寸为:叉指电极长度 l 为 $4000\mu\text{m}$,叉指电极和电阻条宽度均为 $10\mu\text{m}$,电阻条和叉指电极间距为 $20\mu\text{m}$,铝层厚度为 $1.5\mu\text{m}$,聚酰亚胺层厚度为 $2\mu\text{m}$,叉指电极和铝电阻条总数为 133,整个芯片面积为 $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ 。

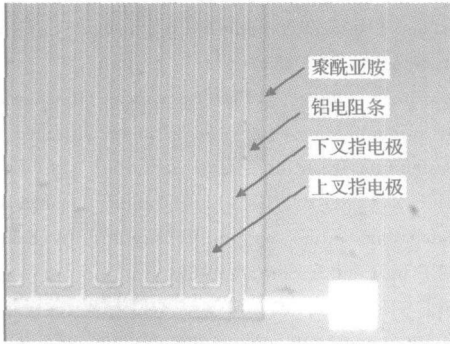


图 6 传感器芯片照片

Fig. 6 Photograph of the chip

本文对制作的湿度传感器的滞回特性、温度系数以及测温电阻的温度特性进行了测量。

使用太航航空仪表集团生产的 SYSD-1 型双压湿度发生器(二级)作为标准湿度检测箱,它能产生的恒温范围为 $-10 \sim 40$,湿度范围为 $15\% \text{RH} \sim 95\% \text{RH}$ 。电容、电阻测量仪器为常州扬子电子有限公司生产的 LCR 数字电桥,在 10kHz 的测试频率下,电容测量的精度为 0.01pF ,在 1kHz 的测试频率下,电阻的测量精度为 0.001 。

首先将传感器放入湿度发生器中,温度调节为 25 ,调节湿度发生器从 $15\% \text{RH}$ 上升到 $95\% \text{RH}$,每隔 $10\% \text{RH}$ 作为一个测试点,传感器处于吸附状态,在每一个测试点记录下一个敏感电容值,然后从 $95\% \text{RH}$ 降到 $15\% \text{RH}$,同样是每 $10\% \text{RH}$ 作为一个测试点,此时传感器处于脱湿状态。测试结果如图 7 所示。从图中可以看到湿度传感器的滞回特性良好,最大湿滞约为 $5\% \text{RH}$ 。在低湿情况下灵敏度较低,在高湿情况下灵敏度较高,这是由于高湿情况下,聚酰亚胺表面易形成水膜,水的介电常数接近

80 ,而聚酰亚胺在高湿下的介电常数为 4 ,因此高湿时的感湿机理发生了变化,使测量电容值大大提高。此传感器在 25 的灵敏度为 $0.015\text{pF}/\% \text{RH}$,从 $15\% \text{RH} \sim 95\% \text{RH}$,电容实际变化量为 1.23pF ,这与上面推导的理论值基本符合。

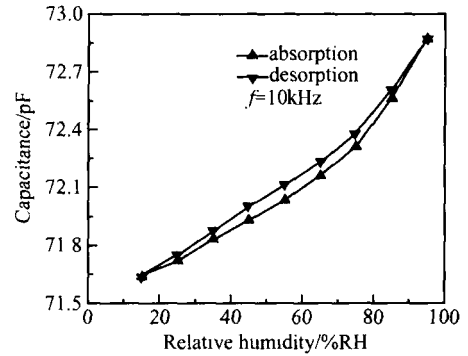


图 7 湿度传感器吸湿脱湿曲线

Fig. 7 Absorption and desorption curves of the humidity sensor

温度系数是反映湿度传感器湿度特性曲线随温度变化的特性,图 8 给出了不同温度下相对湿度与测量电容值的关系曲线。从图 8 可以看出随着温度的升高,相同湿度下测量电容值变大。 $5, 15, 25, 35$ 下湿度传感器的灵敏度分别为 $0.010, 0.012, 0.015$ 和 $0.024\text{pF}/\% \text{RH}$ 。即随着温度的升高,湿度传感器的灵敏度也提高。湿度传感器的电容温度系数 c_t 为 $0.0318\% /$,其计算公式为:

$$c_t = \frac{C_2 - C_1}{C_1 (T_2 - T_1)} \times 100\% \quad (8)$$

其中 C_1 和 C_2 分别是 $5, 35$ 下相对湿度为 $85\% \text{RH}$ 时的测量电容值。

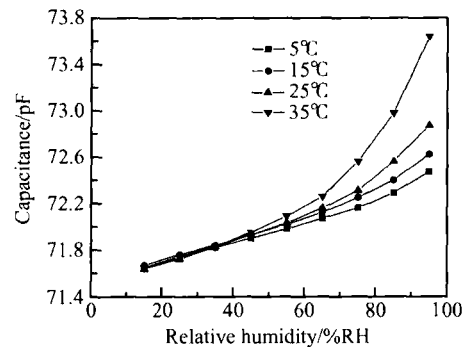


图 8 不同温度下相对湿度与测量电容值的关系曲线

Fig. 8 Practical capacitance versus RH at different temperatures

上面推导得出在相对湿度从 0% RH 变化到 100% RH, 电容理论变化值为 6.86 ~ 8.59 pF, 变化量为 1.73 pF. 而从实际测量曲线上可以看出 25 时, 相对湿度从 15% RH 变化到 95% RH, 电容实测值为 71.64 ~ 72.87 pF, 变化量为 1.23 pF. 理论值和实际测量值相比较可以看出, 全湿度量程的电容变化量基本吻合, 但实测零点电容值比理论值要大很多, 这是由于湿度传感器是连接到引线上进行测量的, 电容测量值除了包含湿敏电容外还包括引线电容以及传感器本身的寄生电容, 因此在作出湿度传感器测试特性曲线时需要将引线电容予以去除.

利用铝电阻条的温度系数可以通过测量铝电阻的变化来获得环境温度值, 图 9 为铝电阻条阻值随温度变化的测量曲线, 温度变化范围为 10 ~ 34 °C, 每隔 1 °C 测量一次, 从图上可以看出曲线的线性度相当好, 温度每升高一度, 电阻增大 0.63 Ω. 拟合曲线的表达式为:

$$R = 0.6275 T + 141.635 \quad (9)$$

这样通过测量铝电阻条的阻值就可以换算出测试环境的温度值.

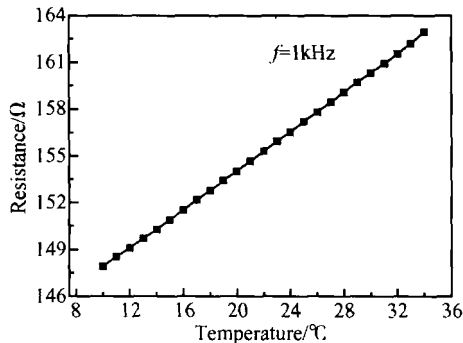


图 9 铝电阻的温度电阻变化曲线

Fig. 9 Resistance versus temperature of aluminium resistance

5 结论

本文设计并制作了一个 CMOS 工艺兼容的温

湿度传感器, 给出了感湿理论模型, 用 COVENTOR 软件进行了模拟, 对传感器做了实际测试, 将理论值和实际测量值进行了比较并给出了分析结果. 该传感器将温度和湿度的检测合二为一, 提高了传感器的集成度和可靠性. 它能够利用标准的 CMOS 工艺加上后道工序完成传感器的制作, 因此具有重复性好、一致性高的优点, 特别适合大批量生产.

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] Tatsuo Y. Integrated humidity and temperature sensor. Proc Transducers, 1987: 658
- [3] Lacorite J, Wilmart V, Flandre D, et al. High-sensitivity capacitive humidity sensor using 3-layer patterned polyimide sensing film. IEEE Int Conf Sensors, 2003: 372
- [4] Lee C Y, Lee G B. MEMS-based humidity sensors with integrated temperature sensors for signal drift compensation. IEEE Int Conf Sensors, 2003: 384
- [5] 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
- [6] 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]
- [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
- [10] Rao Y, Que J, Wong C P. Electrical and mechanical modeling of embedded capacitors. Proceedings of the 49th Electronic Components & Technology Conference, 1999: 506

Fabrication of CMOS Compatible One-Bodied Humidity and Temperature Sensor *

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 one-bodied humidity and temperature sensor ,including structural dimensions and a humidity sensing model ,is presented. The sensor is simulated by the finite element software COVENTOR. A fabrication process for the sensor is presented and the sensor is measured. The theoretical and measured values are compared. Results show that the sensitivity of the sensor is 0.015pF/ %RH at 25 °C ,the capacitance changes about 1.23pF from 15 %RH to 95 %RH.

Key words : humidity and temperature sensors ; polyimide ; capacitive

EEACC : 1220B ; 2180B ; 2575F

Article ID : 0253-4177(2005)07-1428-06

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(No.2004AA404030)

Peng Shaohua male ,was born in 1981 ,MS candidate. He is engaged in research on CMOS MEMS.

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 23 October 2004 ,revised manuscript received 13 December 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics