

文章编号 1004-924X(2011)01-0118-06

基于 555 多谐振荡器检测的碳纳米管湿敏传感器

赵振刚¹, 刘晓为^{1,2}, 王 鑫¹, 金海燕¹, 谭晓昀¹

(1. 哈尔滨工业大学 MEMS 中心, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 微系统与微结构加工教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对使用仪器检测电容型碳纳米管湿度传感器的电容信号不利于传感器的使用与推广问题, 提出了一种基于 555 多谐振荡式电路检测的电容型碳纳米管湿度传感器。首先, 分析了传感器工作原理以及检测电路的检测原理, 设计并制作了电容型碳纳米管湿度传感器; 然后, 分别使用仪器及检测电路对传感器进行测试; 最后, 对传感器响应时间进行了测试与分析。实验结果表明, 该传感器在环境相对湿度从 11% 变化到 97% 过程中, 电容相对灵敏度为 905%, 输出频率相对灵敏度为 889%, 两者较为吻合, 表明该电路能很好地将电容信号转化为频率信号输出。另外, 传感器对湿度的响应时间约为 4 s, 恢复时间约为 18 s, 功耗约为 12 mW, 具有功耗低、响应速度快等优点。

关键词: 碳纳米管; 湿度传感器; 多谐振荡器; 频率输出

中图分类号: TP212.2; TN752.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111901.0118

Carbon nanotube sensors based on 555 multivibrators

ZHAO Zhen-gang¹, LIU Xiao-wei^{1,2}, WANG Xin¹, JIN Hai-yan¹, TAN Xiao-yun¹

(1. MEMS center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Key Laboratory of Micro-systems and Micro-structures Manufacturing, Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The capacitive signals of capacitive carbon nanotube humidity sensors are usually tested by measuring instruments, which restricts the uses and developments of the sensors seriously. Focusing on this problem, one kind of capacitive carbon nanotube humidity sensor based on a 555 multivibrator was presented. Firstly, the principle of the sensor and the detecting circuit were discussed, and the sensor was designed and fabricated. Then, the sensor was tested by both the RCL apparatus and the proposed circuit, respectively. Finally, the response and recovery time of the sensor was tested. The testing results demonstrate that when the Relative Humidities (RH) surrounding the sensor change from 11% to 97%, the capacitive sensitivity and the output frequency sensitivity of the sensor are 905% and 889%, respectively. The frequency sensitivity is closed to the capacitive sensitivity, which means the circuit can well change capacitive signals to frequency signals. Furthermore, the adsorption and desorption time of the sensor is about 4 s and 18 s, respectively, which shows the sensor can offer

收稿日期: 2010-03-17; 修订日期: 2010-06-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60776049)

low power consumption and fast response and has potential application prospects.

Key words: carbon nanotube; humidity sensor; multivibrator; frequency output

1 引言

湿度是影响人类生产和生活的重要因素之一,随着信息产业的发展以及工业化的进步,湿度不仅仅直接影响着人类基本的生活条件,还表现出对工农业、生物制品、医药卫生、国防建设等方面的极大影响。因此,对湿度的测量和相关的敏感元件和仪器的研究也倍受关注。

目前,湿敏器件种类繁多,但就其所使用的感湿材料而言,大致可分为 3 大类:电解质型、陶瓷型以及高分子聚合物型^[1-6]。这些类型的传感器目前都存在着相应的问题与缺陷。例如:电解质类湿度传感器不能长期应用于高湿环境中;陶瓷类湿敏器件温度系数较高,并且不耐污染。目前,这两种材料已受到高分子型材料的巨大冲击,但高分子型湿敏器件也存在着长期稳定性差和响应时间较长等缺点,通常响应时间为几十甚至上百秒,如文献^[7]中传感器响应时间与恢复时间分别约为 62 s 和 40 s。因此,寻求新型敏感材料已成为湿度传感器发展的一条重要出路。

碳纳米管自 1991 年被日本电镜学家 Iijima^[8]在用电弧法制备 C₆₀ 的过程中首次发现后,其独特的结构及优良的力学、电学和化学等性能很快吸引了材料、物理、电子、化学等领域众多科学家的极大关注,成为国际新材料领域的研究前沿和热点。碳纳米管湿度传感器也由于其突出的性能,如响应速度快等,已受到学术界广泛的关注。

目前,国内外对碳纳米管湿度传感器的研究很广泛^[9-11],但基本只限于使用仪器对传感器进行测量,不利于传感器的使用与推广。本文提出一种基于 555 多谐振荡式电路检测的碳纳米管湿度传感器。该传感器结构为电容型,使用 555 多谐振荡式电路作为传感器检测电路,具有体积小、功耗低、数字信号输出等优点。

2 传感器结构与制作

电容式碳纳米管湿度传感器电极结构示意图

如图 1 所示,采用叉指式电极用以有效地增大两电极正对面积,进而增大传感器电容^[12]。

选择碳纳米管作为传感器湿敏材料。碳纳米管具有纳米尺度的直径和中空的管状结构(实验中使用的碳纳米管直径为 10~20 nm),使得在敏感薄膜内部易于发生毛细凝聚现象。当传感器所处环境湿度增加时,传感器内部发生毛细凝聚现象,析出水的量随之增加,而水的相对介电常数比较大,约为 80,从而使得传感器电容值随湿度增加而变大。

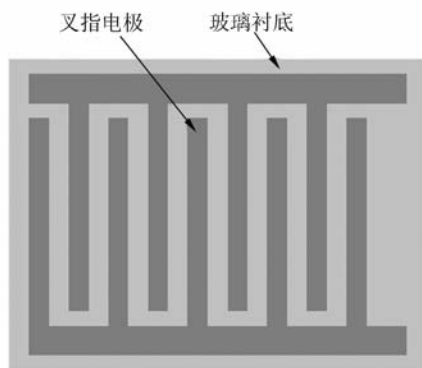


图 1 传感器电极示意图

Fig. 1 Schematic drawing of sensor electrode

根据此原理设计并制作了一种电容式碳纳米管湿度传感器,利用叉指电极来感应碳纳米管薄膜介电常数随湿度的变化。传感器制作工艺流程如图 2 所示。使用蒸镀工艺在玻璃衬底上制作一层约 1 μm 厚的 Al 金属层,并通过光刻工艺将金属 Al 制成叉指电极;通过丝网印刷方法将混

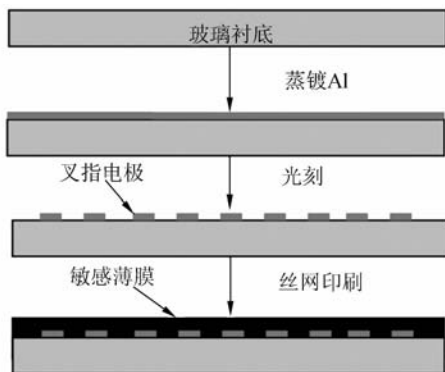


图 2 传感器制作流程图

Fig. 2 Schematic diagram of fabrication process

合有乙基纤维素和松油醇的碳纳米管浆料涂敷在电极表面^[13];最后通过真空烧结完成传感器的制作,传感器敏感芯片体积大约为 8 mm×8 mm×1 mm。

3 多谐振荡器工作原理分析

555 多谐振荡器电路结构比较简单,并且人们对该电路原理的研究也比较成熟,因此,这里提出使用 555 多谐振荡式电路对传感器电容进行检测。检测电路如图 3 所示,虚线框内部为传感器。由于该电路的振荡源于对传感器电容的充放电,故传感器电容的改变会直接影响电路振荡频率的变化,由此可以将传感器电容信号转换为频率信号输出。

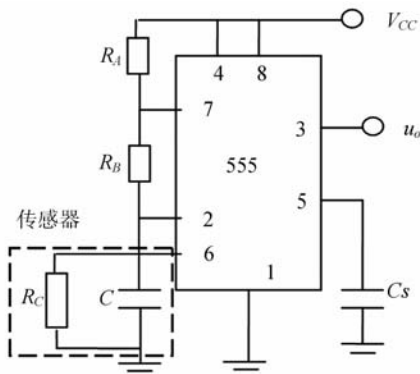


图 3 传感器检测电路图

Fig. 3 Schematic diagram of sensor circuit

根据 555 定时器的工作原理对电路进行分析,同时考虑传感器体电阻对传感器电容(C)的充电电流的影响,该电路对 C 的充电时间 T_1 为:

$$T_1 = \frac{(R_A + R_B)R_C C}{R_A + R_B + R_C} \ln \frac{\frac{V_{CC}R_C}{R_A + R_B + R_C} - \frac{V_{CC}}{3}}{\frac{V_{CC}R_C}{R_A + R_B + R_C} - \frac{2V_{CC}}{3}}, \quad (1)$$

式中: R_A, R_B 为充放电电阻; R_C 为传感器体电阻; C 为传感器电容; V_{CC} 为电源电压,这里设定为 5 V。

与常规的多谐振荡器相比,传感器电容的放电过程增加了体电阻 R_C 放电通路,等效放电电阻为 R_B 与 R_C 的并联,根据多谐振荡器放电时间表达式,放电时间 T_2 为:

$$T_2 = \frac{R_B R_C C}{R_B + R_C} \ln 2. \quad (2)$$

通过控制传感器薄膜内碳纳米管与低温玻璃

粉的比例,可有效增大传感器电阻 R_C ,使得 R_C 远大于充放电电阻 R_A, R_B 。实验中选用电阻 R_A, R_B 均为 20 k Ω ,传感器体电阻 R_C 为 5 M Ω ,因此,式(1),(2)可以近似表示为式(3),(4)。

充电时间可近似为:

$$T_1 \approx (R_A + R_B)C \ln 2, \quad (3)$$

放电时间为:

$$T_2 \approx R_B C \ln 2. \quad (4)$$

因此,多谐振荡式电路输出频率 f 的近似表达式为:

$$f = \frac{1}{T_1 + T_2} \approx \frac{1}{\ln 2 (R_A + 2R_B)C}. \quad (5)$$

如式(5)所示,多谐振荡电路输出频率与传感器电容呈反比关系,通过对输出频率的检测可以对传感器电容值进行测量,进而得出环境相对湿度值(Relative Humidity, RH)的变化情况。

4 测试结果与分析

应用封闭空间中特定温度下不同饱和盐溶液所对应的相对湿度不同的原理,使用 LiCl, CH₃COOK, MgCl₂, K₂CO₃, Mg(NO₃)₂, CuCl₂, NaCl, KCl, K₂SO₄ 等 9 种不同饱和盐溶液对传感器进行测试,如图 4 所示。9 种饱和盐溶液室温下所对应的相对湿度分别为 11%, 23%, 33%, 43%, 52%, 67%, 75%, 86%, 97%。

分别使用 RCL 自动测试仪以及多谐振荡电路对传感器电容进行测试,对传感器特性及检测电路性能进行了分析。

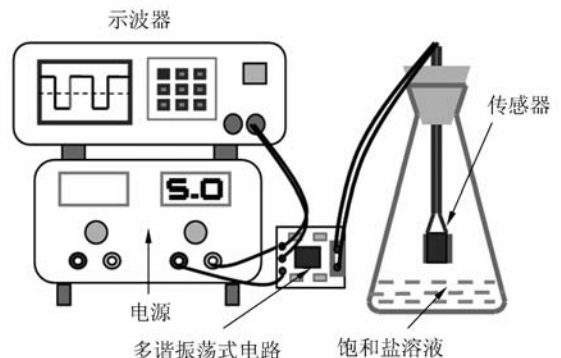


图 4 传感器测试示意图

Fig. 4 Schematic diagram of testing system

4.1 传感器电容灵敏度分析

使用 FLUKE 公司的 PM6306-RCL 自动测

测试仪对不同相对湿度下传感器电容值进行测试,测试结果如图 5 所示。

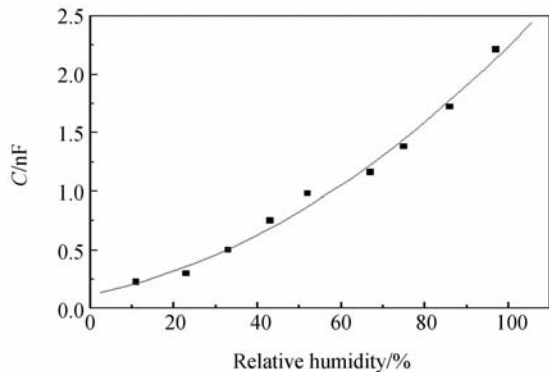


图 5 传感器电容随相对湿度变化曲线

Fig. 5 Sensor capacitance variation with RH

从图中曲线可得,随着传感器周围环境相对湿度增加,传感器电容明显变大。当环境相对湿度从 11% 变为 97% 过程中,传感器电容从 0.22 nF 变化为 2.21 nF。定义传感器电容灵敏度 S_C 为:

$$S_C = \frac{C_{97\%} - C_{11\%}}{C_{11\%}} \times 100\% \quad (6)$$

计算得传感器电容灵敏度 S_C 约为 905%。

4.2 传感器频率灵敏度分析

使用 555 多谐振荡式电路对传感器进行测试。电路板面积为 $2 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$, 厚度(含电路元件) $< 5 \text{ mm}$, 加上敏感芯片体积 ($8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$), 传感器整体体积可以做到小于 $2 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm} \times 0.8 \text{ cm}$ 。使用示波器对传感器输出频率进行读取,测试曲线如图 6 所示。

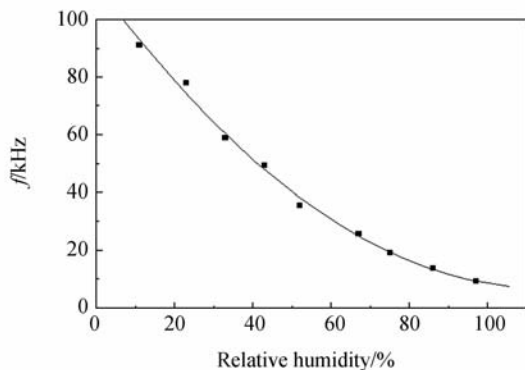


图 6 传感器输出频率随相对湿度变化曲线

Fig. 6 Sensor frequencies variation with RH

从测试曲线可以看出,随环境相对湿度增加,谐振电路输出频率下降。在环境相对湿度从

11% 变为 97% 的过程中,传感器输出频率从 91 kHz 变化为 9.2 kHz。

由于电容灵敏度 S_C 可以表示为:

$$S_C = \frac{C_{97\%} - C_{11\%}}{C_{11\%}} \times 100\% = \frac{\frac{1}{C_{11\%}} - \frac{1}{C_{97\%}}}{\frac{1}{C_{97\%}}} \times 100\% \quad (7)$$

又根据式(5),传感器输出频率正比于 $1/C$, 因此为便于比较频率灵敏度与电容灵敏度,定义传感器频率输出灵敏度为:

$$S_f = \frac{f_{11\%} - f_{97\%}}{f_{97\%}} \times 100\% \quad (8)$$

根据测试结果对传感器频率灵敏度进行计算得传感器频率灵敏度为 $S_f = 889\%$ 。可见,传感器频率灵敏度与电容灵敏度基本相符,其中存在少量偏差可能为测试误差以及传感器不稳定等因素所造成。

传感器工作电压为 5 V, 工作电流约 2.35 mA, 功耗约为 12 mW, 与目前市面民用低功耗湿度传感器功耗相当(如日本神荣公司产品 RHU-233A 温湿度传感器模块功耗为 10 mW), 可见,该传感器具有低功耗的特点。

4.3 传感器响应速度

传感器的响应与恢复时间是衡量传感器性能的重要指标之一,直接制约传感器的使用与推广。本文测试了传感器从相对湿度 97% 的环境进入到 11%, 再恢复至 97% 的过程中频率值变化情况。在每种湿度环境中放置 1 min, 测试点间隔 2 s, 测试结果如图 7 所示。

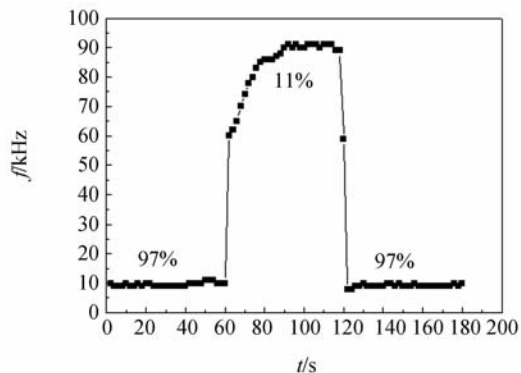


图 7 传感器响应与恢复曲线

Fig. 7 Response and recovery curves of sensor

通过图 7 曲线可以近似得出传感器响应与恢复时间。定义传感器响应时间为传感器输出达到最大变化量 90% 时所对应时间,即传感器相对湿度从 11% 变化到 97% 的响应时间(吸附时间)为输出频率达到式(9)时所对应的时间,而相对湿度从 97% 变化到 11% 的响应时间(脱附时间)为输出频率达到式(10)时所对应的时间,有

$$f_1 = f_{11\%} - (f_{11\%} - f_{97\%}) \times 90\%, \quad (9)$$

$$f_2 = f_{97\%} + (f_{11\%} - f_{97\%}) \times 90\%, \quad (10)$$

根据测试结果和以上定义,传感器响应时间约为 4 s,恢复时间约为 18 s,可见传感器对水汽的吸附易于解吸,以物理吸附为主。

从图 7 曲线还可以对传感器的稳定性进行分析,如图可见,传感器先后两次在相对湿度 97% 环境中时,频率偏差在 1 kHz 以内,可见传感器具有较好的恢复特性。

参考文献:

- [1] JUHASZ L, MIZSEI J. Humidity sensor structures with thin film porous alumina for on-chip integration [J]. *Thin Solid Films*, 2009, 517: 6198-6201.
- [2] LI H L, ZHANG J, TAO B R, *et al.*. Investigation of capacitive humidity sensing behavior of silicon nanowires [J]. *Physica*, 2009, E(41): 600-604.
- [3] TAO B R, ZHANG J, MIAO F J, *et al.*. Capacitive humidity sensors based on Ni/SiNWs nanocomposites [J]. *Sensors and Actuator*, 2009, B(136): 144-150.
- [4] SUN A H, HUAN L, LI Y. Study on humidity sensing property based on TiO₂ porous film and polystyrene sulfonic sodium [J]. *Sensors and Actuator*, 2009, B(139): 543-547.
- [5] ZHANG J G, PANG CH, FANG ZH, *et al.*. Micro integrated pressure, temperature, and relative humidity sensor using adhesive bonding with SU28 [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6): 1350-1354.
- [6] LV X, LI Y, LI P, *et al.*. A resistive-type humidity sensor based on crosslinked polyelectrolyte prepared by UV irradiation [J]. *Sensors and Actuator*, 2009, B(135): 581-586.
- [7] GU L, HUANG Q A, QIN M. A novel capacitive-type humidity sensor using CMOS fabrication technology [J]. *Sensors and Actuators*, 2004, B(99): 491-498.

5 结 论

本文设计并制作了一种基于 555 多谐振荡器检测的碳纳米管湿度传感器,分别使用 RCL 自动测试仪以及多谐振荡电路对传感器进行了测试与分析。测试结果显示,传感器功耗约为 12 mW,传感器的相对湿度从 11% 变化到 97% 过程中,电容灵敏度为 905%,而输出频率灵敏度为 889%,相对偏差为 1.77%,可见该电路可以很好地将电容信号转换为频率信号,实现对传感器电容值的检测。另外,对传感器响应速度进行分析得到,传感器响应时间约为 4 s,恢复时间约为 18 s,表明传感器具有相对较好的恢复特性。由此可见,该传感器体积小、功耗低、响应速度快,具有潜在的应用前景。

- [8] IJIMA S. Helical microtubules of graphitic carbon [J]. *Nature*, 1991, 354: 56-58.
- [9] YOO K P, LIM L T, MIN N K, *et al.*. Novel resistive-type humidity sensor based on multiwall carbon nanotube/polyimide composite films [J]. *Sensors and Actuators*, 2010, B(145): 120-125.
- [10] LIU L T, YE X Y, WU K, *et al.*. Humidity sensitivity of carbon nanotube and poly(Dimethyldiallylammonium Chloride) composite films [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(10): 1308-1314.
- [11] YU H, CAO T, ZHOU L, *et al.*. Layer-by-Layer assembly and humidity sensitive behavior of poly(ethyleneimine)/multiwall carbon nanotube composite films [J]. *Sensors and Actuators*, 2006, B(119): 512-515.
- [12] 李应良, 潘武. 射频系统中 MEMS 谐振器和滤波器 [J]. *光学精密工程*, 2004, 12(1): 47-54.
LI Y L, PAN W. MEMS resonators and filters in RF systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1): 47-54. (in Chinese)
- [13] 梁晋涛, 刘诗斌, 刘君华, 等. 碳纳米管压阻微悬臂梁红外热探测器 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(4): 682-688.
LIANG J T, LIU SH B, LIU J H, *et al.*. Micro-cantilever thermal infrared detector with carbon nanotubes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 682-688. (in Chinese)

作者简介:



赵振刚(1981—),男,内蒙古兴安盟人,博士研究生,2005年、2007年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事传感器领域的研究。E-mail: zhaozhenganghit@126.com



王鑫(1987—),男,黑龙江五大连池人,硕士研究生,2009年于西北工业大学获得学士学位,主要从事传感器领域的研究。E-mail: tracy8152@126.com



金海燕(1983—),女,黑龙江鹤岗人,硕士研究生,2007年于哈尔滨理工大学获得学士学位,主要从事传感器领域的研究。E-mail: jin_899@hotmail.com



谭晓红(1960—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,1982年、1988年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事微纳传感器及其集成化技术等方面的研究。E-mail: txj@hit.edu.cn

导师简介:



刘晓为(1955—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1982年、1988年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,现为哈尔滨工业大学微电子科学与技术系主任,主要从事集成多功能传感器、传感器接口 ASIC 芯片、微流体系系统、生物芯片等方面的研究工作。E-mail: lxw@hit.edu.cn

●下期预告

制造用高功率激光器光束质量的评价与测量

陈虹,王旭葆

(北京工业大学 激光工程研究院,北京 100124)

以现代激光工业制造为应用背景,建立了制造用高功率激光器光束质量的评价体系与测量方法。研究了该体系所采用的评价参数、测量原理、测量方法、测量仪器以及测量结果的计算和分析。首先,对目前存在的评价激光光束质量参数进行了比较和判断。接着,以光束传输比(M^2)和光束参数积(K_f)为重点,阐述了光束质量评价参数与光束束宽定义之间的关系。然后,提出了工业应用背景下光束质量的评价参数。最后,介绍了基于实测目的的光束质量测量方法和实际测量结果。测量结果表明:DC035Slab CO₂激光器的 K_f 值为 3.78 mm · mrad, TLF6000tCO₂激光器的 K_f 值为 8.67 mm · mrad。