

폴리이미드 박막을 이용한 집적화 습도센서

안 광 호 민 남 기
고려대학교 제어계측공학과

An Integrated Humidity Sensor Based on Thin Polyimide Films

Kwang Ho An Nam Ki Min
Korea University

Abstract - A polyimide-based capacitive humidity sensor has been designed and fabricated using silicon integrated-circuit technology, and its performance measured. The sensor showed excellent linearity, low temperature coefficient, and low hysteresis over a wide range of relative humidity and temperature. The signal conditioning circuits for detecting relative humidity and converting it to voltage have been developed based on a charge redistribution between capacitors using switched capacitors

극사이에 노출된 폴리이미드 감습막에 수증기가 접촉되면, 물분자는 stripe의 양측으로부터 막내부로 확산해 들어간다. 폴리이미드의 유전율은 건조상태에서 매우 낮으나(약 $\epsilon=3.5$), 물분자가 흡착되면 물분자의 유전률이 훨씬 높기($\epsilon=80$) 때문에 등가유전율은 증가한다. 물분자의 습달착에 의한 감습막의 유전률 변화는 센서의 정전용량 변화로 나타나며, 상대습도 $x(\%)$ 에서 센서의 정전용량 $C(x)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C(x) = C_{x0} + k \frac{dC(x)}{dx} \quad (1)$$

여기서 C_{x0} 는 상대습도 0[%]에서 정전용량, k 는 습도센서의 구조에 의존하는 상수이다.

1. 서론

종래에는 습도센서가 단순한 생활환경의 습도관측에만 사용되어 왔으나, 최근에는 산업이 고도화되고 쾌적한 공간을 추구하는 경향에 따라 현대산업 및 사회전반에 걸쳐 안정된 습도계측제가 점점 강하게 요구되고 있다. 습도를 검지하여 전기적 신호로 변환하는 방식에는 주로 임피던스 변화와 정전용량 변화를 이용하는 센서가 가장 많이 실용화되고 있으며, 정전용량식 습도 센서는 온도 의존성이 비교적 적고 저습 영역에서 측정이 용이한 점등 뛰어난 특성을 갖고 있지만, 신호처리회로가 고가로 되는 단점으로 인하여 계측기 분야에서 주로 사용되어 왔으나 최근 회로기술의 진보와 마이크로컴퓨터의 저가화에 따라 사용되는 분야가 점점 넓어지고 있다. 폴리이미드 수지는 내열성, 기계적 강도, 내약품성이 우수하고, 적절한 흡수율을 가지며 체적저항률이 높기 때문에 최근 용량형 습도센서의 감습재료로 주목받고 있는 고분자이다[1-3].

본 논문에서는 반도체 집적회로기술을 이용하여 실리콘 기판상에 폴리이미드를 감습막으로하는 집적화 용량형 습도센서와 신호처리회로를 설계제작하고 그 특성을 간단히 고찰하였다.

II. 센서소자의 설계 및 제작

그림 1은 본 논문에서 설계한 습도센서의 구조를 나타낸 것으로, 상부 전극은 수 많은 stripes로 구성된다. 전

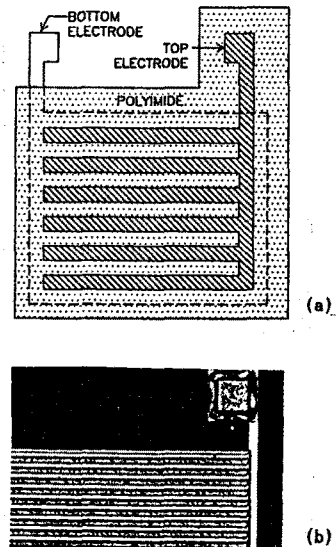


그림 1 설계된 습도센서의 구조

그림 1에 나타낸 습도센서의 제작 과정을 간단히 설명하면 다음과 같다. 먼저 n 또는 p형 (100) 4인치 웨이퍼를 RCA 방법으로 initial cleaning한 후 열산화법에 의해 두께 0.5 - 1 μm 의 산화막을 성장시켰다. Al-1% Si를 sputtering에 의해 5,000Å 두께의 하부전극을 형성

하였다. 이 위에 폴리이미드를 막 두께 1-5 μm 로 spin-coating한 다음, 1차로 90°C에서 30분간, 200-300°C에서 1 - 3시간 동안 2차 cure하였다. 마지막으로, 상부전극은 Al-1% Si를 5000 Å 두께로 증착한 후 패터닝하여 형성하였다. 제작된 wafer는 1.5 x 1.5 mm 크기의 칩으로 자른 다음, 각 센서 칩을 세라믹 패키지에 attach한 후 와이어 본딩하였다. 그림1(b)는 제작된 습도센서 소자의 상부전극을 보여 준다. 그림에서 stripe폭과 간격은 각각 10 μm 이다.

III. 신호처리회로 칩 설계 및 제작

식(1)에 주어진 습도센서의 정전용량 변화를 감지하여 상대습도에 비례하는 디지털 또는 아날로그 신호로 출력할 수 있는 회로 설계는 매우 중요하다. 현재 정전용량 변화를 전기적 신호로 변환하기 위한 여러 방법이 제안되고 있다[4-6]. 본 논문에서는 커패시터간의 전하재분배원리를 이용하여 습도센서의 정전용량 변화를 직접 출력 전압의 변화로 나타내는 회로를 설계하였다. 이 회로는 다른 회로와 접속하기 쉬우며, 구성이 간단하고, 집적화가 용이한 장점을 갖는다. 그림 3은 센서 회로의 전체 구성도를 나타낸다. 증폭회로는 스위치, 커패시터, op-amp로 구성되며, 동작 특성상 크게 세 블록으로 나뉘어진다. 블록 A는 습도 센서의 정전용량 C_x 을 기준 커패시터 C_s 와 비교하여 그 비 $(V_r C_x)/C_s$ 를 전압으로 출력한다. 블록 B는 블록 A에서 출력되는 전압 중 offset 용량에 의한 전압만큼을 Block C에 인가하여 그 차를 보상해주는 회로이다. 블록 C는 블록 A와 블록 B에서 전달된 전압을 비교하여 그 차이를 출력하는 회로로서, 블록 A의 출력전압에서 offset 용량에 해당하는 전압을 제거한 순수한 상대습도에 비례하는 전압만을 출력하게 된다.

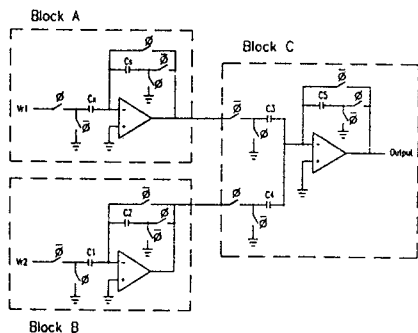


그림 3 상대습도를 전압으로 변환하는 전체 회로도

그림 4는 입력 클럭이 '1' 일때의 회로 상태를 나타낸다. 습도센서 C_x 는 기준전압 V_r 에 의해 $(V_r C_x)$ 의 전하량으로 충전되고, 기준 커패시터 C_s 는 완전히 방전된 상태로 있다. offset 제거 부분에서는 전 클럭 단계에서 C_1 에 저장되어 있던 전하 $(V_r C_1)$ 이 C_2 로 전하 재분배를 일으키면서 전압 $(V_r C_1)/C_2$ 을 점 ⑤에 출력하게 된다. 이 전압의 크기는 위의 가정에 의하여 습도센서의 offset 용량에 의해서 생기는 전압의 크기와 같으며, 이 전압이 C_4 를

충전시킨다. 이때 C_3 는 전 클럭 단계에서 $(V_r C_x)/C_s$ 의 전압으로 충전되어 있는 상태이므로 C_3 와 C_4 의 정전용량의 차이에 따라 $(V_r C_x C_3)/C_s - (V_r C_1 C_4)/C_2$ 만큼의 전하량이 C_5 로 전달된다. 한편 가정에 의하여 $C_1/C_2 = C_{x0}/C_s$ 및 $C_3=C_4$ 이므로, C_5 에 전달되는 전하량 Q_5 는 $Q_5 = V_r(C_x - C_{x0})C_3/C_s = C_5 V_{out}$ 로 되고, 최종 출력전압 V_{out} 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_{out} = \frac{(C_x - C_{x0}) C_3}{C_s C_5} V_r \quad (2)$$

위식에서 C_x 를 제외한 다른 모든 양들은 상수이므로 회로의 출력 전압은 습도센서의 정전용량 변화에 의해서만 결정되며, 따라서 출력 전압은 상대습도에 비례하는 값을 가지게 된다. 또한 offset 용량에 의한 영향이 제거되었으므로 출력 전압의 범위는 0 - V_{max} 로 된다. 여기서 V_{max} 는 회로가 출력할 수 있는 최대 출력 전압이다. 다른 회로와 접속시 V_{max} 를 조정할 필요가 있을 경우에는 커패시터간의 비율을 조정하거나 또는 집적화 등으로 인하여 그것이 불가능할 경우는 기준 전압 V_r 을 조정함으로써 가능하다. 위 회로에서 스위치들은 PMOS와 NMOS가 한쌍으로 되어있는 transmission gate를 사용하였고, 연산 증폭기는 외부회로를 구동시킬 수 있는 충분한 출력전류와 phase margin 확보에 중점을 두고 설계하였다. 신호처리 회로는 one poly-double metal 1.2 μm 공정을 사용하여 제작하였다. 1 μm x 1 μm 면적의 poly-to-metal의 정전용량은 0.06[fF]이다. 그림 3의 회로에서 커패시터중 C_x 와 C_s 는 외부에서 장착하게 하였고 C_1, C_2, C_3 의 정전용량은 1[pF], 면적은 16,875 [μm^2], C_4, C_5 의 용량은 2[pF], 면적은 33,750 [μm^2]이다.

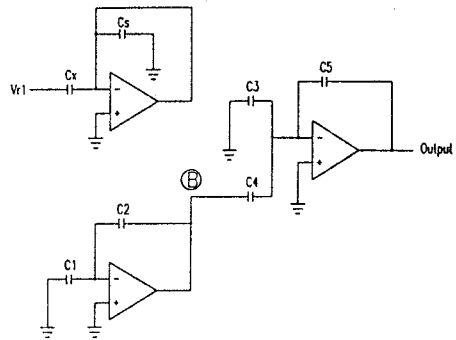


그림 4 입력 클럭이 '1' 일때의 회로도

IV. 실험결과 및 검토

습도센서의 정전용량 변화는 센서를 항온항습조(또는 포화염 용액)에 넣은 후 각 습도점에서 30분간 방치한 후 HP LCR 미터를 사용하여 주파수 1[MHz]에서 측정하였다.

그림 5는 제작된 습도센서의 감습특성을 나타낸다. 정전용량은 저습에서 고습에 이르기까지 상대습도에 대해 거의 직선적으로 변화하고, 그 변화량은 소자에 따라 약 0.35 - 0.16 pF/%RH 범위에 분포하였다. 100[%]부근에서는 용량변화의 측정이 곤란하였다.

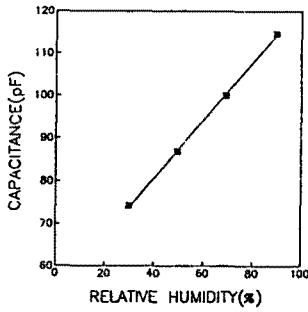


그림 5 정전용량 - 상대습도 특성

그림 6은 센서의 히스테리시스 특성을 나타낸 것으로 습도센서의 측정 정도(재현성)를 결정하는 중요한 인자이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 단시간 히스테리시스, 장시간 히스테리시스가 모두 작음을 알 수 있다.

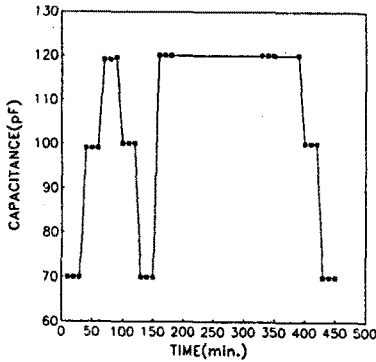


그림 6 히스테리시스 특성

정전용량의 온도의존성을 그림 7에 나타내었다. 정전용량값은 전습도 영역에 걸쳐 고온으로 갈수록 약간 증가하는 특성을 갖는다. 흡습한 폴리이미드의 정전용량은 주어진 온도에서 흡수될 수 있는 물의 최대 최적비, 물의 비유전율, 폴리이미드의 비유전율등 여러 인자에 의해서 결정된다. 폴리이미드의 비유전율은 온도에 거의 무관한 것으로 알려지고 있다. 따라서 온도 증가에 따른 정전용량의 미소 변화는 물의 유전율의 온도의존성에 기인한다고 생각된다.

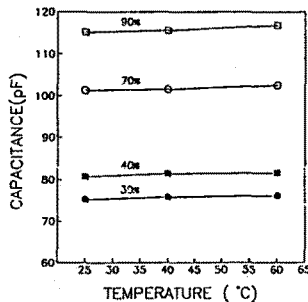


그림 7 감습특성의 온도 의존성

그림 8은 센서 회로의 출력 전압을 나타낸 것으로 상대습도에 비례하는 출력 전압이 얻어짐을 알 수 있으며, 회로의 특성은 이론적으로 예측한 것과 거의 동일하였다.

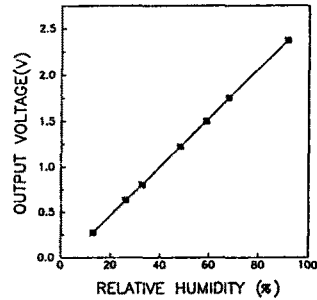


그림 8 상대습도와 출력전압과의 관계특성

V. 결론

본 논문에서는 집적회로 기술을 이용해 실리콘 기판 상에 폴리이미드를 감습막으로하는 초소형 습도센서를 설계 제작하여 그 특성을 측정하였다. 제작된 습도센서는 상대습도에 대한 용량변화의 직선성이 매우 양호하였고, 극히 작은 히스테리시스 특성을 나타내었다. 정전용량의 온도의존성은 존재하지만 측정된 온도범위에서는 매우 작았다.

또한, 상대습도를 측정하기 위해서 정전용량의 변화를 상대습도로 변환하는 신호처리 회로 칩을 설계 제작 하였으며, 출력 전압이 상대습도에 정비례함을 확인하였다.

참고문헌

- [1] D.D.Denton et al., "Moisture Diffusion in polyimide Films in Integrated Circuits," J. of Electronic Materials, Vol.14, No.2, 119(1985).
- [2] P.J.Schubert and J.H.Nevin, "Polyimide-Based Capacitive Humidity Sensor," IEEE trans. Electron Dev., Vol. ED-32, No.7, 1220(1985).
- [3] S.Tsutchitani, T.Sugawara, N.Kinjo and S.Ohara, "A Humidity Sensor Using Ionic Copolymer and Its Application to A Humidity-Temperature Sensor Module," Sensor and Actuators, Vol.15, No.4, december, 1988.
- [4] H. Matsumoto and K. Watanabe, "A Switched-Capacitor Digital Capacitance Meter," IEEE Trans. Instrum. & Meas., Vol. IM-35, 555(1986).
- [5] H. Shimizu, H. Matsumoto, M. Askura, and K. Watanabe, "A Digital Hydrometer," IEEE Trans. Indrm. and Meas., Vol. 37, No.2, 300(1988)
- [6] 홍석인, 민남기, 김수원, "폴리이미드와 Al₂O₃ 박막을 이용한 초소형 습도센서의 개발" 상공부 연구보고서(1992).