

論文98-35D-9-11

폴리이미드 박막을 이용한 투 칩 집적화 습도 센서

(Two-Chip Integrated Humidity Sensor Using Thin Polyimide Films)

閔 南 基 *, 金 壽 遠 **, 洪 錫 仁 ***

(Nam-Ki Min, Soo-Won Kim, and Suk-In Hong)

요 약

본 논문에서는 정전용량형 센서 칩과 CMOS 인터페이스 칩으로 구성된 투 칩 집적화 습도 센서를 개발하였다. (100) 실리콘 기판위에 폴리이미드 박막을 이용해서 제작된 습도 센서 칩은 넓은 습도 및 온도 범위에 걸쳐 우수한 직선성(0.72%FS), 낮은 히스테리시스(<3%), 작은 온도계수(-0.0285~-0.0542 pF/K)를 나타내었다. 40°C/90%RH에서 9주동안 방치한 후 측정된 정전용량은 약 2~3% 변화였다. 신호처리 회로는 1.2- μ m, one poly double metal CMOS 공정으로 제작하였다. 측정된 센서 출력 전압은 상대습도에 비례해서 변화였으며, 이론치와 잘 일치하였다.

Abstract

A two-chip humidity sensor system has been developed which consists of a capacitive sense element die and a CMOS interface chip. The sense element was fabricated using thin polyimide films on (100) silicon substrate and showed excellent linearity(0.72%FS), low hysteresis (<3%) and low temperature coefficient(-0.0285~-0.0542pF/K) over a wide range of relative humidity and temperature. The capacitance-relative humidity characteristic exhibited a drift of 2~3% after 9 weeks of exposure to 40°C/90%RH. The signal-conditioning circuitry was fabricated using an 1.2- μ m, one poly double metal CMOS process. The measured output voltage of the sensor system was directly proportional to relative humidity and showed good agreement with theory.

I. 서 론

* 正會員, 高麗大學校 制御計測工學科

(Department of Control and Instrumentation Engineering, Korea University)

** 正會員, 高麗大學校 電子工學科

(School of Electronics Engineering, Korea University)

*** 正會員, 高麗大學校 化學工學科

(Department of Chemical Engineering, Korea University)

※ 이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 학제간 연구지원사업에 의해서 연구되었음.

接受日字:1998年3月23日, 수정완료일:1998年7月27日

최근 산업이 고도화되고 쾌적한 공간을 추구하는 경향에 따라 산업체와 민생 분야에서 습도 측정 및 제어의 필요성이 점점 강하게 요구되고 있으며, 그 이용 분야도 급속히 확대되어 가는 추세이다. 특히 자동차나 가전기기 분야와 같이 습도센서가 마이크로프로세서에 의해 제어되고, 소형·저가격이 요구되는 경우에는 집적화 습도 센서의 개발이 반드시 필요하다. 최근 소형화 및 다기능화를 목적으로 반도체 미세 가공기술과 폴리이미드 박막을 이용해서 실리콘을 베이스로한 초소형 집적화 습도센서의 연구가 활발히 진행되고 있

다. 폴리이미드 수지는 1~3% 전후의 적절한 흡수율을 가지며, 체적 저항률(10^{16} ~ $10^{17}\Omega\cdot\text{cm}$)이 매우 클 뿐만 아니라 동시에 내열성, 기계적 강도, 내약품성 등 내환경성이 우수하여 신뢰성이 높은 정전용량형 습도 센서의 감습 재료로서 주목받고 있는 고분자이다.^[1-4] 더구나 폴리이미드는 오랫동안 실리콘 집적회로 제작에 사용되어 왔던 재료이기 때문에 IC 기술을 이용해 양산성과 균일성이 우수한 박막제작이 가능하다. 현재 폴리이미드 습도 센서에는 유전율 변화를 이용한 정전용량형^[5-14], 체적변화를 이용한 피에조 저항형^[15-19], 질량변화를 이용한 공진 멤브레인형^[20] 등이 있으나, 우수한 특성을 갖는 정전용량 방식이 실용화에 가장 접근해 있다.

Schubert와 Navin^[6]은 처음으로 실리콘 기판에 폴리이미드를 베이스로한 정전용량형 습도 센서를 발표하였다. 균일한 흡습과 평등전계를 실현하기 위해서 상부전극을 동심원으로 설계하였으나, 제작만 복잡할뿐 스트라이프(stripe) 구조와 특성상의 차이가 없다. Shimizu^[7], 朝倉 正博^[11], Shibata^[14] 등은 상부전극을 스트라이프 구조로 하고, 하부전극을 실리콘 기판 뒷면에 설치한 정전용량형 습도 센서를 개발하였다. 이러한 구조는 산화막 형성이 불필요하여 제작은 간단하지만, 집적화나 본딩상 불리하고, 실리콘 벌크저항과 정전용량, PI-Si 및 전극-Si 사이의 계면 등이 센서 특성에 매우 큰 영향을 미친다. 인용논문 [7]과 [11]에서는 센서 소자의 직선성이 보정할 필요가 없을 정도로 우수하나, 가장 최근에 발표한 논문 [14]에서는 센서 소자가 크기만 다를 뿐 동일한 구조임에도 불구하고 상당한 비직선성을 나타내었으며, 또 인용논문 [7]과 [14]에서는 센서의 정전용량이 온도에 따라 감소하지만, 인용논문 [11]에서는 반대로 증가하는 모순이 있다. 한편, 정전용량형 습도센서의 특성은 우수하나 일반적으로 저항형에 비해서 신호처리회로가 복잡하고 고가로 되어 사용분야가 제한된다. Shimizu^[7], 朝倉 正博^[11], Shibata^[14] 등은 용량형 습도센서의 신호처리회로를 개발하였으나, 집적화하지는 않았다. 이러한 경우 센서 시스템의 소형화와 저가화는 불가능하다. Jaafar^[8] 등은 스위치 커패시터 구동회로를 집적화 하였다. 그러나 출력의 비직선성이 매우 크고, 고습 영역에서 상당한 드리프트를 나타내었다. 이와 같은 배경 하에서, 본 논문에서는 실리콘 기판에 산화막을 형성하고 그 위에 폴리이미드를

감습막으로 한 정전용량형 습도 센서 칩과, 회로를 상당히 간략화 시켜 집적화한 신호처리 IC칩을 제작하여 하나로 패키징한 초소형 정전용량형 집적화 습도 센서 시스템을 개발하였다. 일반적으로 투 칩 집적화 센서는 개별 부품(discrete component) 방식보다 인터페이스 회로의 초소형화와 저가격화를 실현할 수 있으며, 단일 칩(single chip) 방식에 비해 센서구조와 신호처리회로의 설계 및 제조 공정을 최적화시킬 수 있고 유연성이 큰 장점을 갖는다.

II. 습도 센서 소자의 동작원리

집적화 용량형 습도 센서는 금속-폴리이미드-금속(또는 실리콘)의 구조를 갖는다. 그림 1은 습도센서에서 폴리이미드막 내부로 물분자의 확산을 모델화한 것이다. 상부 전극은 다수의 스트라이프(stripe)로 구성되어 있으며, 수증기가 전극 사이의 폴리이미드 감습막에 흡착된 후 전극 양측으로부터 내부로 확산해 들어간다. 감습막인 폴리이미드의 유전율은 건조상태에서 매우 낮으나(약 $\epsilon_r=3$ 전후), 유전율이 훨씬 높은 물분자(약 $\epsilon_r=80$)가 흡착되면 등가 유전율이 증가한다. 물분자의 흡탈착에 의한 감습막의 유전율 변화는 센서의 정전용량 변화로 나타나며, 상대습도 $X\%$ 에서 센서의 정전용량 $C(X)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C(X) = C_{ox} + k \frac{dC(X)}{dX} \quad (1)$$

여기서 C_{ox} 는 상대습도 0%에서 정전용량, k 는 습도 센서의 형상에 의존하는 상수이다.

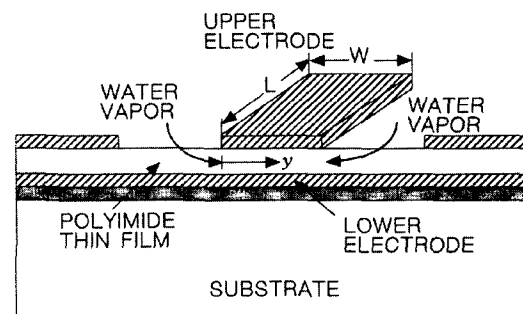


그림 1. 폴리이미드 박막 내부에서 물 확산의 일차원 모델

Fig. 1. One dimensional model of water vapor diffusion into thin polyimide film.

폴리이미드 박막을 통한 물의 확산은 폴리이미드 내부에 물이 전혀 존재하지 않는다고 가정하고 표면에 흡착된 물이 내부로 확산해 가는 indiffusion과, 처음부터 내부가 균일한 수분으로 채워져 있고 이 상태에서부터 물이 밖으로 확산해 가는 outdiffusion을 생각할 수 있다. 상부전극을 구성하는 스트라이프의 길이/폭비(L/W ratio)가 매우 크고 폴리이미드 막두께가 스트라이프 폭보다 훨씬 작다고 가정하면, 박막 내부에서 물의 확산은 1차원적 모델로 근사시킬 수 있으며, 일반적인 Fick의 확산 방정식은

$$\frac{\partial N(y, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N(y, t)}{\partial y^2} \quad (2)$$

여기서, $N(y, t)$ 는 폴리이미드 박막내부에서 물 농도, D 는 물의 확산계수, t 는 확산시간이다. 식(2)에 대해, 공간에만 의존하는 함수와 시간에만 의존하는 함수의 곱으로 되는 해가 존재한다고 가정하면,

$$N(y, t) = Y(y) \cdot T(t) \quad (3)$$

식(3)을 식(2)에 대입하고 변수분리하면 다음과 같은 두 개의 상미분 방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{DT} \frac{dT}{dt} &= -\lambda \\ \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} &= -\lambda \end{aligned} \quad (4)$$

그림 1로부터 경계조건은 다음과 같다.

outdiffusion인 경우 : $y=0$ 및 $y=W$ 에서, t 에 대해 $N=0$
 $0 < y < W$ 에서, $t=0$ 에 대해 $N=N_0$

Indiffusion인 경우 : $y=0$ 와 $y=W$ 에서 t 에 대해 $N=N_0$
 $0 < y < W$ 에서, $t=0$ 에 대해 $N=0$

여기서, N_0 는 폴리이미드 표면에서 물 농도이다. 식(4)의 해를 구하고 경계조건을 대입하면, 상부전극 밑의 폴리이미드막 내부에서 물 농도에 대한 표현 식은 다음과 같이 얻어진다.^[21]

outdiffusion에 대한 물 농도 :

$$N(y, t) = \frac{4N_0}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \cdot \sin \frac{(2n+1)\pi y}{W} \cdot \exp \left[- \left(\frac{(2n+1)\pi}{W} \right)^2 Dt \right] \quad (5)$$

indiffusion에 대한 물 농도 :

$$N(y, t) = N_0 \left\{ 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \cdot \sin \frac{(2n+1)\pi y}{W} \cdot \exp \left[- \left(\frac{(2n+1)\pi}{W} \right)^2 Dt \right] \right\} \quad (6)$$

식(6)을 이용해 폴리이미드막 내부로 물이 확산에 들어갈 때 위치에 따른 물 농도의 변화를 y/W 의 함수로 나타내면 그림 2와 같다. 그림에서 물 농도의 분포는 좌우 대칭이며 농도가 균일하게 될 때까지 확산이 계속해서 일어남을 볼 수 있다.

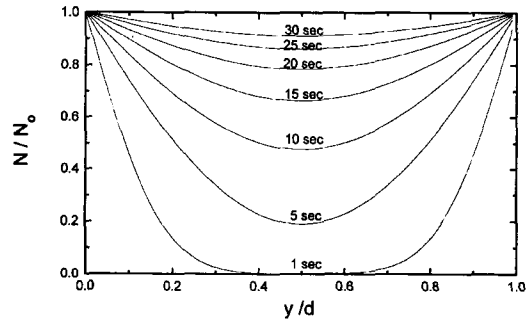


그림 2. 여러 시간에서 폴리이미드 박막내부로 확산되는 물 농도의 공간적 변화
 Fig. 2. Spatial variations of normalized water concentration at different times.

또 물의 농도가 전극 중앙에서 최소로 되므로, 센서의 응답시간은 전극 중앙의 물 농도가 평형상태에 도달하는 시간에 의해서 결정된다고 생각할 수 있다. 그림 3은 여러 전극 폭에 대해 중앙($y/W=0.5$)에서 시간에 따른 물 농도의 과도특성을 나타낸 것이다. 전극 폭이 작을수록 평형상태에 도달하는 시간이 짧아짐을 알 수 있다.

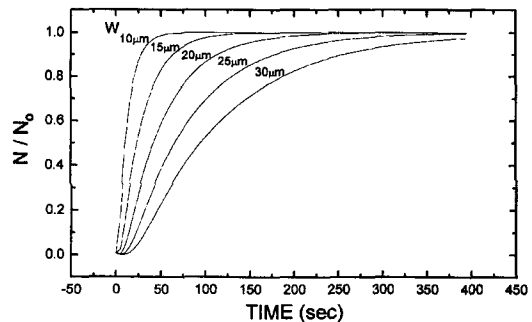


그림 3. 전극중앙($y/W=0.5$)에서 물 농도의 과도응답
 Fig. 3. The normalized water concentration transients at $y/W=0.5$.

그림 3의 과도응답곡선으로부터 얻어진 응답시간(90%도달시간)의 전극 폭 의존성을 나타내면 그림 4와 같다. 습도 센서의 응답시간은 전극 폭의 자승에 비례하여 증가함을 볼 수 있으며, 스트라이프형 전극

을 갖는 센서의 구조 설계시 반드시 고려해야될 중요한 인자라고 생각된다.

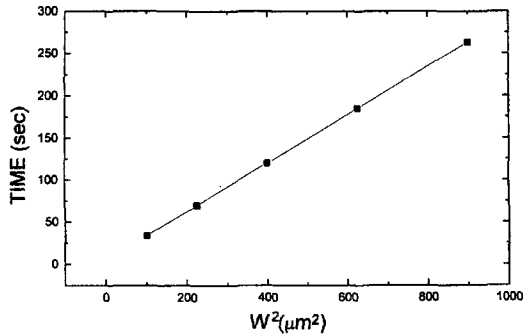


그림 4. 전극폭에 따른 응답시간의 변화
Fig. 4. Variation of response time with electrode width.

III. 습도 센서 소자의 제작

그림 5는 제작된 센서 칩 구조를 나타낸다. 습도 센서는 n-형 (100) 4" 실리콘 웨이퍼위에 제작되었다. 먼저 열산화법에 의해 두께 0.5~1 μm 산화막을 성장시킨 후 TMAH 용액에서 이방성 에칭하여 다이아프램을 형성하였다. 하부전극은 Al-1%Si를 스퍼터링에 의해 5,000 Å 두께로 증착하였다.

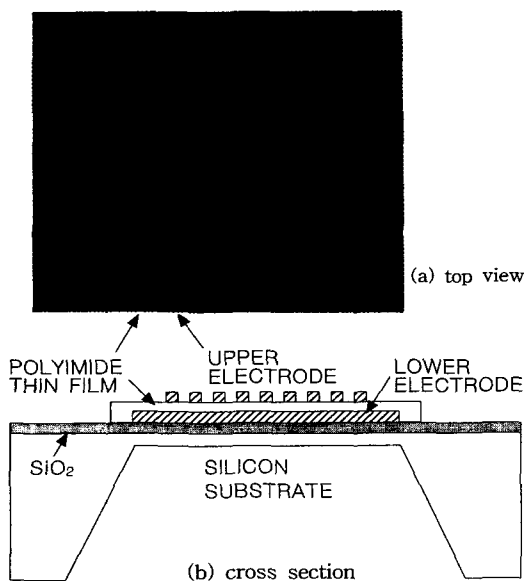


그림 5. 정전용량형 습도 센서 칩의 구조와 감습부
Fig. 5. Top view and cross section of capacitive humidity sensor chip.

폴리이미드를 막 두께 1~3 μm로 스핀-코팅한 다음, 90 °C에서 30분간 1차 프리베이크(prebake)한 후, 250~350 °C에서 1~2시간 동안 2차 cure하였다. 마지막으로 Al-1%Si를 5000 Å 두께로 증착한 후 패터닝하여 상부전극을 형성하였다. 제작된 센서 칩은 2 mm × 2 mm 크기로 자른 다음, 세라믹 패키지에 부착한 후 와이어 본딩하였다.

그림 5(a)는 제작된 센서 소자의 상부전극과 감습부를 보여주는 사진이다. 사진에서 스트라이프 폭과 간격은 각각 10 μm 이다.

IV. 신호처리회로 설계 및 제작

정전용량식 습도 센서의 신호처리회로는 저항변화 방식에 비해 복잡하기 때문에, 실제 응용에서 식 (1)로 주어진 습도 센서의 정전용량 변화를 상대습도에 비례하는 애널로그 또는 디지털 신호로 출력할 수 있는 용량-전압 변환회로의 설계는 매우 중요하다. 현재 정전용량 변화를 전기적 신호로 변환하기 위한 여러 방법이 제안되고 있으나, 본 논문에서는 커패시터간의 전하 재분배 원리^[22]를 이용한 검출회로를 설계 제작하였다.

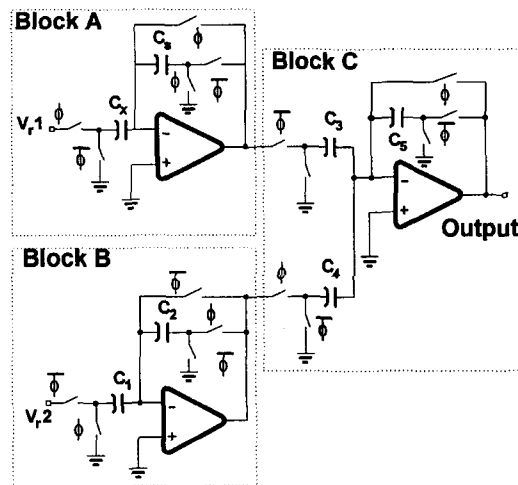


그림 6. 상대 습도를 전압으로 변환하는 전체회로
Fig. 6. Signal-conditioning circuit diagram.

이 방식은 습도 센서의 정전용량이 기준 커패시터의 몇 배 정도 되는가를 측정하고 그 비를 전압으로 변환함으로써, 사용되는 커패시터의 크기를 줄일 수 있고 구성이 간단하여 집적화가 용이할 뿐만 아니라, 습도

센서의 용량변화를 전압변화로 직접 출력하기 때문에 다른 제측기와의 접속이 매우 편리한 장점을 갖는다.

그림 6은 검출 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 A의 출력 전압 중에서 오프셋(offset) 커패시터스에 대응되는 전압만큼을 블록 C에 인가하여 오프셋 커패시터스의 영향을 제거한다. 블록 C는 블록 A와 블록 B로부터 전달된 전압을 비교하여 그 차를 출력하는 회로로서, 오프셋 전압이 제거된 순수한 상대 습도에 대응하는 전압만을 출력한다. 전체 회로의 동작을 입력 클럭의 위상에 따라 둘로 구분하여 설명하면 다음과 같다. 여기서 습도센서의 오프셋 커패시터를 C_{xo} 라고 가정하고 $C_1/C_2 = C_{xo}/C_s$ 가 되도록 C_1 과 C_2 의 크기를 조정한다. 그리고 $C_3=C_4$ 상태에서 블록 A와 블록 B에 동일한 기준전압 V_r 를 인가한다.

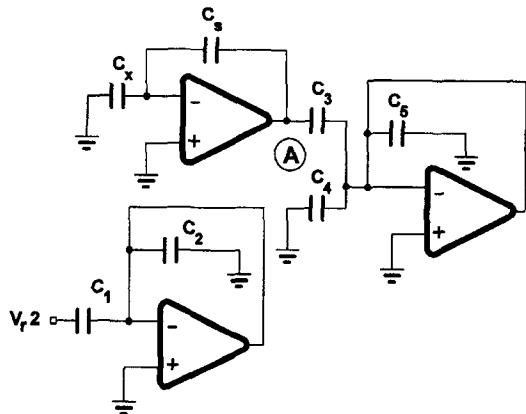


그림 7. 입력 클럭이 "0" 일 때의 회로 동작 상태
Fig. 7. Phase 1 of circuit operation(input clock : 0).

그림 7은 입력 클럭이 '0' 일 때의 회로 상태를 나타낸다. 이 전의 클럭 단계에서 습도 센서 C_x 에 충전되어 있던 전하량 $(V_r C_x)$ 가 C_s 에 의해 재분배되어 A 점의 출력 전압은 $(V_r C_x)/C_s$ 으로 되고, 비교기의 C_3 를 충전시킨다. 하단의 오프셋 제거 부분에서는 C_1 이 기준전압 V_r 로 충전되고 C_2 는 완전히 방전된다. 또 우측의 비교기에서 C_3 는 전술한 바와 같이 전압 $(V_r C_x)/C_s$ 로 충전되고 C_4 와 C_5 는 각각 완전히 방전된다.

그림 8은 입력 클럭이 '1' 일 때의 회로도이다.

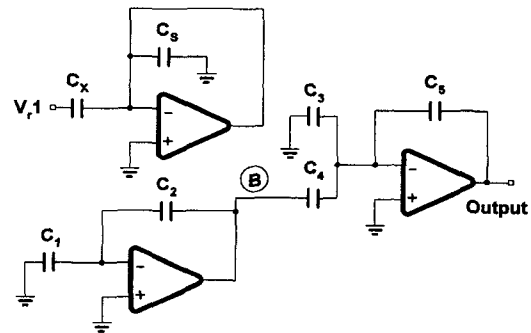


그림 8. 입력 클럭이 "1"일 때의 회로 동작 상태
Fig. 8. Phase 2 of circuit operation(input clock:1).

습도 센서 C_x 는 기준전압 V_r 에 의해 $(V_r C_x)$ 의 전하량으로 충전되고 기준 커패시터 C_s 는 완전히 방전된 상태로 있게 된다. 오프셋 제거 부분에서는 이전의 클럭 단계에서 C_1 에 저장되어 있던 전하 $(V_r C_1)$ 이 C_2 로 전하 재분배를 일으키면서 이에 의한 전압 $(V_r C_1)/C_2$ 을 점 B에 출력하게 된다. 이 전압의 크기는 가정에 의하여 습도 센서의 오프셋 용량에 의해 생기는 전압의 크기와 같으며, 이 전압이 C_4 를 충전시킨다. 이때 C_3 는 이전의 클럭 단계에서 $(V_r C_x)/C_s$ 의 전압으로 충전되어 있는 상태이므로 C_3 와 C_4 의 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 $C_1/C_2 = C_{xo}/C_s$ 및 $C_3=C_4$ 이므로 C_5 에 전달되는 전하량 Q_5 는

$$Q_5 = \frac{C_3(C_x - C_{xo})}{C_s} V_r = C_5 V_o \quad (7)$$

가 되므로, 최종 출력 전압 V_o 은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_o = \frac{C_3(C_x - C_{xo})}{C_s C_5} V_r \quad (8)$$

위 식에서 C_x 를 제외한 다른 모든 값들은 상수이다. 따라서, 센서의 출력 전압은 습도센서의 정전용량 변화에 의해서만 결정되므로, 상대 습도에 비례하는 값을 가지게 된다. 또한 상대 습도 0%에서 $C_x = C_{xo}$ 이므로 오프셋 커패시터스에 의한 영향이 제거되어 출력 전압의 범위는 0에서 V_{max} 까지가 된다. 여기서 V_{max} 는 회로가 출력할 수 있는 최대 출력전압으로서, V_{max} 의 조정이 필요할 경우 커패시터간의 비율이나 기준전압 V_r 을 변화시킴으로써 가능하다.

위 회로에서 스위치들은 PMOS와 NMOS가 한 쌍

으로 되어있는 트랜스미션 게이트(transmission gate)를 사용하였다. 회로에 사용된 op-amp는 외부 회로를 구동시킬 수 있는 충분한 출력 전류와 위상여유도(phase margin) 확보에 중점을 두고 설계하였다.

신호처리회로는 1.2- μm one poly-double metal 공정을 사용하여 제작하였다. $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ 면적의 poly-to-metal의 정전용량은 0.06 pF이다. 그림 6의 회로에서 C_x 와 C_s 는 외부에서 장착할 수 있게 하였고 C_1 , C_2 , C_5 의 정전용량은 1 pF, 면적은 $16,875 \mu\text{m}^2$, C_3 , C_4 의 용량은 2 pF, 면적은 $33,750 \mu\text{m}^2$ 이다. 그림 8은 제작된 신호처리회로 칩 사진이다.

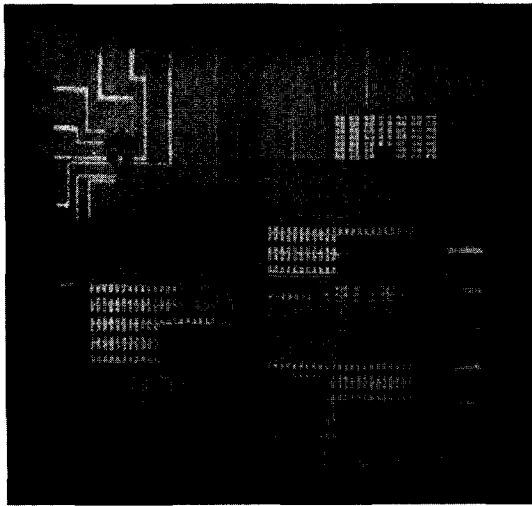


그림 9. 신호처리 IC 칩 사진
Fig. 9. A photograph of the signal-conditioning IC chip.

V. 실험 결과 및 검토

습도 센서의 정전용량 변화는 센서를 항온항습조에 넣은 후 각 습도 점에서 30분간 방치한 후 HP LCR 미터를 사용하여 주파수 1 MHz에서 측정하였다.

그림 10은 제작된 습도 센서의 감습특성을 나타낸 것이다. 정전용량은 저습에서 고습에 이르기까지 상대 습도에 비례해서 증가하였으며, 매우 우수한 직선성(약 0.72%FS)을 나타내었다. 100% 부근에서는 측정이 불안정하여 정확한 정전용량의 값을 얻기가 곤란하였다. 상대습도 X 에서 센서의 정전용량 $C(X)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.^[14]

$$C(X) = \frac{\epsilon_{eq}}{\epsilon_{PI}} C_{X0} \quad (9)$$

여기서, ϵ_{PI} 는 건조 상태에서 폴리이미드의 비유전율, ϵ_{eq} 는 흡습 상태에서 폴리이미드의 등가 비유전율이다. 그림 10의 직선으로부터 $C(X)/C_{X0}$ 를 계산하면 90%RH에서 약 1.27로 되며, 본 논문의 측정 범위에서는 $C(90\%RH)/C(11\%RH) = 1.23$ 이 얻어졌다. 이 값들은 폴리이미드를 이용한 다른 논문의 결과와 잘 일치한다.^{[2] [14]}

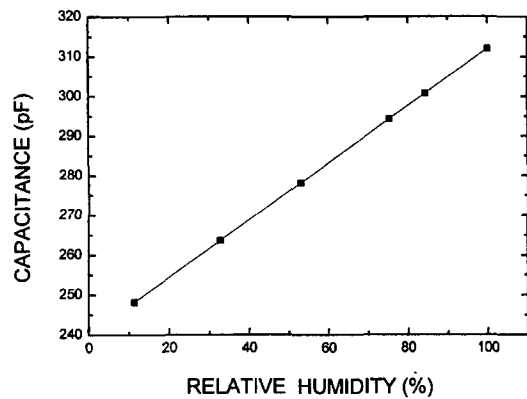


그림 10. 센서의 정전용량 - 상대습도 특성
Fig. 10. Sensor capacitance vs. relative humidity.

그림 11은 기습 및 제습 시 히스테리시스 특성을 나타낸 것으로 습도 센서의 측정 정도(재현성)를 결정하는 중요한 요인이다. 히스테리시스 특성은 저습-고습-저습의 순서로 각 상대습도에서 30분이 경과한 후 정전용량값을 측정하여 결정하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 히스테리시스가 3% 이하로 되었으며, 습도 센서로서 매우 바람직하다고 생각된다.

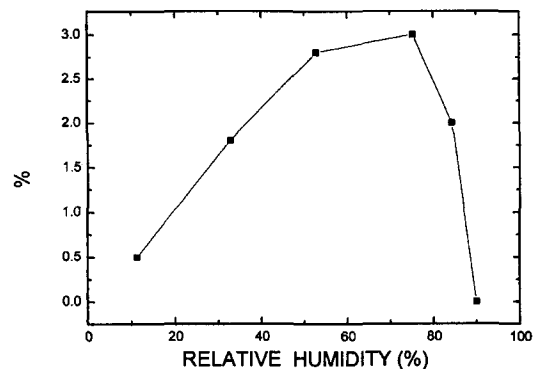


그림 11. 히스테리시스 특성
Fig. 11. Hysteresis characteristic.

정전용량의 온도 의존성을 그림 12에 나타내었다.

정전용량 값은 저습에서 고습에 이르기까지 전습도 영역에 걸쳐 고온으로 갈수록 약간 감소하는 경향을 가지고 있다. 흡습한 폴리이미드의 정전용량은 주어진 온도에서 흡수될 수 있는 물의 최대 최적비, 물의 비유전율, 폴리이미드의 비유전율 등 여러 인자에 의해서 결정된다. 그러나 폴리이미드의 비유전율(ϵ_{PI})은 온도에 거의 무관한 것으로 알려지고 있으므로, 온도 증가에 따른 정전용량의 미소변화는 물의 비유전율의 온도 의존성에 기인한다고 생각된다. 물의 비유전율은 [23]

$$\epsilon_w = 78.54[1 - 4.6 \times 10^{-4}(T - 298) + 8.8 \times 10^{-6}(T - 298)^2] \quad (10)$$

로 주어진다. 여기서 T 는 절대온도이다. 식(10)으로부터 단위 온도 당 비유전율의 변화율을 계산하면 0.0114/K가 얻어진다. 그림 11의 실험값으로부터 구해진 정전용량의 변화율은 측정 범위에서 약 -0.0285 ~ -0.0542 pF/K였으며, 고습으로 갈수록 온도 의존성은 증가하였다. 또한 두 온도에서 물의 유전율 비는 $\epsilon_w(278\text{ K})/\epsilon_w(313\text{ K})=1.0051$ 이고, 측정된 습도 센서의 정전용량 비는 $C(278\text{ K})/C(313\text{ K})=1.0040\sim 1.0062$ 로 되어 등가 비유전율(ϵ_{eq})의 온도 특성은 물의 비유전율에 의해 지배되고 있음을 알 수 있다.

한편 장기 신뢰성 시험을 두 가지 방법으로 실시하였다. 먼저, 실내방치 시험에서 3일간은 정전용량이 서서히 증가하며 불안정하였으나, 1개월 시험기간중 용량변화는 약 2%RH 이내로 안정되었다. 또, 40°C/90%RH의 고온 고습 중에서 습도 센서를 9주동안 방치하였을 경우, 약 2~3%의 용량변화가 발생하였다.

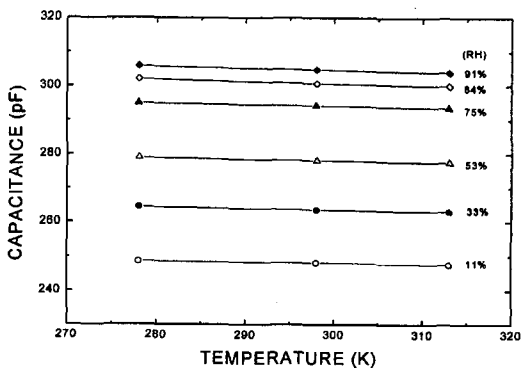


그림 12. 여러 상대습도에서 정전용량의 온도 의존성
Fig. 12. Measured capacitance as a function of temperature for several values of RH.

신호검출회로의 동작 특성을 확인하기 위해, 제작한 정전용량-전압변환회로 칩의 출력단에 상용A/D 변환기와 7-세그먼트 디스플레이를 접속하여 출력이 상대습도를 직접 지시하도록 PCB를 제작하였다. 그림 13은 측정된 습도 센서의 출력 전압과 상대습도의 관계를 나타낸 것으로, 저습과 고습에서 측정치와 계산치가 미소한 차이를 보이고 있으나, 측정 범위 내에서 출력 전압이 직선적으로 증가함을 알 수 있다. 또, 측정치는 이론적으로 계산한 결과와 잘 일치한다. 출력 전압은 습도 센서의 오프셋 커패시턴스 영향이 제거된 순수한 습도 변화에 의한 전압을 의미하므로 별도의 재처리가 다른 회로에 직접 인가하여 사용할 수 있는 특징을 갖는다.

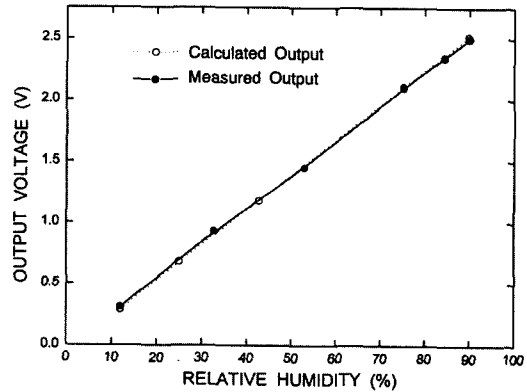


그림 13. 센서 출력전압의 실험치와 이론치의 비교
Fig. 13. Comparison of the measured and calculated output voltages.

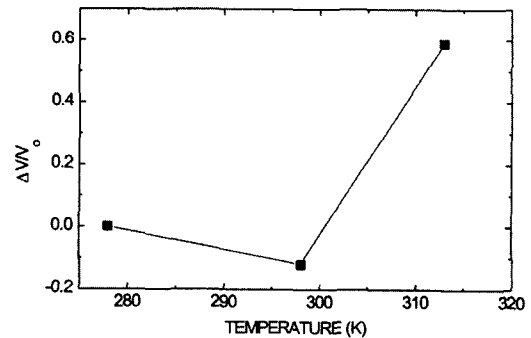


그림 14. 온도에 따른 출력전압의 변화
Fig. 14. Variation of the output voltage with temperature.

그림 14는 온도에 따른 센서 출력전압의 변화를 나타낸 것으로, 측정 온도가 증가함에 따라 출력 전압의 온도계수는 (-)에서 (+)로 반전됨을 볼 수 있다. 그림

12에서 센서 소자의 정전용량은 온도가 증가하면 감소하여 (-)온도계수를 갖는다. 그러나 신호처리회로의 온도특성을 시뮬레이션한 결과 $-15^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 사이에서는 출력전압의 변화가 0%였고, 그 이상의 온도에서는 서서히 증가하였다. 따라서, 두 변화는 서로 상쇄되어 그림 14와 같은 온도특성을 보이는 것으로 생각된다.

VI. 결 론

본 논문에서는 집적회로 기술을 이용해 실리콘 기판 상에 폴리이미드를 감습막으로 하는 용량형 습도 센서 칩과 신호처리회로 칩을 설계 제작하여 투칩 집적화 습도센서를 개발하였고, 그 특성을 측정하였다. 제작된 습도 센서는 상대습도에 대한 용량변화의 직선성은 약 0.72%FS로 매우 양호하였고, 3% 이내의 히스테리시스 특성을 나타내었다. 정전용량의 온도 의존성은 존재하지만 측정된 온도범위 내에서 $-0.0285 \sim -0.0542\text{pF/K}$ 로 되어 매우 작았다. 또 $40^{\circ}\text{C}/90\%RH$ 에서 9주동안 방치한 후 측정된 정전용량은 약 2~3% 변하였다. 제작된 신호처리회로는 센서의 정전용량의 변화를 상대습도의 변화에 비례하는 전압출력으로 정확히 변환하였으며, 이 결과는 이론적 예측치와 잘 일치하였다. 또한 출력전압은 습도센서의 오프셋 커패시턴스 영향이 제거된 순수한 습도 변화에 기인하는 전압이므로 별도의 재처리 없이 다른 회로에 직접 인가할 수 있는 특징을 갖는다.

쾌적성을 지배하는 주요 인자로는 습도 이외에 온도, 기류 등이 있으며, 이들을 습도와 함께 검출하기 위해서는 실리콘과의 복합화가 필요하다. 이와 같은 관점에서 볼 때, 본 논문에서 개발한 집적화 습도 센서는 아직 시작에 불과하며, 본 대학에서는 현재 온도, 습도, 기류, 가스를 동시에 검출할 수 있는 초소형 복합화 센서를 개발 중에 있다.

참 고 문 헌

- [1] J.Melcher, Y.Daben and G.Arlt, "Dielectric Effects of Moisture in Polyimide," IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol. 24, no. 1, pp. 31~38, 1989.
- [2] D.D. Denton, D.R. Day, D.F. Priore and S.D.Senturia, "Moisture Diffusion in Polyimide Films in Integrated Circuits", J. of Electronic Materials, vol. 14, no. 2, pp. 119~136, 1985.
- [3] E.Sacher and J.R. Susko, "Water Permeation of Polymer Films I. Polyimide," J. Applied Polymer Science, vol. 23, pp. 2355~2364, 1979.
- [4] E.Sacher and J.R. Susko, "Water Permeation of Polymer Films III. High-Temperature Polyimide," J. Applied Polymer Science, vol. 26, pp. 679~686, 1981.
- [5] G.Delapierre, H.Grangé, B.Chambaz and L.Destannes, "Polymer-Based Capacitive Humidity Sensor: Characteristics and Experimental Results," Sensors and Actuators, vol. 4, pp. 97~104, 1983.
- [6] P.J. Schubert and J.H. Nevin, "Polyimide-Based Capacitive Humidity Sensor", IEEE Trans. Electron Dev., vol. ED-32, no. 7, pp. 1220~1223, 1985.
- [7] H. Shimizu H. Matsumoto, M.Asakura, and K.Watanabe, "A Digital Hygrometer," IEEE Trans. Instrum. and Meas., vol. 37, no. 2, pp. 300~304, 1988.
- [8] M.A.S. Jaafar, A.R.K. Ralsten and D.D.Denton, "The long-term reliability of a switched-capacitor relative humidity sensor system," Sensor and material, vol. 3, pp. 111~125, 1991.
- [9] T.Boltshauser and H.Baltes, "Capacitive Humidity Sensors in SACMOS Technology with Moisture Absorbing Photosensitive Polyimide," Sensors and Actuators A, vol. 7, pp. 509~512, 1991.
- [10] T.Boltshauser, L.Chandran, H.Baltes, F.Bose and D.Steiner, "Humidity Sensing Properties and Electrical Permittivity of New Photosensitive Polyimides," Sensors and Actuators B, vol. 5, pp. 161~164, 1991.
- [11] 朝倉 正博, 坂本 哲野, 兼堀 正史, "ポリイミド樹脂を用いた静電容量型湿度センサ", センサ技術, vol. 12, no. 5, pp. 82~86, 1992
- [12] T.Kuroiwa, T.Hayashi, A.Ito, M.Matsuguchi, Y.Sadaoka and Y.Sakai, "A Ca-

- capitive Relative Humidity Sensor Using a Polyimide Sensing Materials," The 7th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, pp. 487~489, 1993.
- [13] A.R.K. Ralston, C.F. Klein, P.E. Thoma and D.D. Denton, "A Model for the Relative Environmental Stability of a Series of Polyimide Capacitance Humidity Sensors," Transducers '95 · Eurosensors IX, pp. 821~824, 1995.
- [14] H.Shibata, M.Ito, M.Asakursa and K. Watanabe, "A Digital Hydrometer Using a Polyimide Film Relative Humidity Sensor," IEEE Trans. Instrum. and Meas., vol. 45, pp. 555~569, 1996.
- [15] G.Gerlach and K.Sager, "A Piezoresistive Humidity Sensor," The 7th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, p. 22~23, 1993.
- [16] K.Sager, G.Gerlach and A.Schroth, "A Humidity Sensor of a New Type," Sensors and Actuators B, vol. 18-19, pp. 85~88, 1994.
- [17] G.Gerlach, K.Sager and A.Schroth, "Simulation of a Humidity-Sensitive Double-Layer System," Sensors and Actuators B, vol. 18-19, pp. 303~307, 1994.
- [18] K.Sager, G.Gerlach and A.Schroth, "Design, Simulation and Meteorological Characteristics of Piezoresistive Humidity Sensors," Sensors and Materials, vol. 6, no. 6, pp. 333~342, 1994.
- [19] K.Sager, A.Schroth and G.Gerlach, "Humidity-Dependent Mechanical Properties of Polyimide Films and Their Use for IC-Compatible Humidity Sensors," Transducers'95 · Eurosensors IX, pp. 821~824, 1995.
- [20] T.Boltshauser, A.Häberli, S.Erni, and H.Baltes, "Integrated Hygrometer in Industrial IC Technology," The 7th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, pp. 24~25, 1993.
- [21] J.Crank, *The Mathematics of Diffusion*, Oxford, Clarendon Press, 1956.
- [22] H.Matsumoto and K.Watanabe, "A Switched-Capacitor Digital Capacitance Meter," IEEE Trans. Instrum. and Meas., vol. IM-35, p. 555~559, 1986.
- [23] J.B. Hasted, *Aqueous Dielectrics*, London, Chapman and Hall, 1973.

저 자 소 개



閔南基(正會員)

1950년 7월 12일생. 1974년 2월 고려대학교 전기공학과 졸업(공학사). 1976년 2월 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1979년 3월 ~ 1984년 8월 동국대학교 전기공학과 조교수. 1989년 8월 Cincinnati 대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1990년 3월 ~ 현재 고려대학교 제어계측공학과 교수. 주관심분야는 반도체소자, 마이크로센서, 마이크로머시닝



金壽遠(正會員)

1952년 1월 10일생. 1974년 2월 고려대학교 공대 전자공학과 졸업. 1976년 2월 고려대학교 대학원 전자공학과 공학석사학위 취득. 1983년 2월 TEXAS A&M 대학원 전자공학과 공학석사학위 취득. 1987년 9월 TEXAS A&M 대학원 전자공학과 공학박사학위 취득. 1987년 9월 ~ 현재 고려대학교 전자공학과 교수. 주관심분야는 아날로그/디지털 VLSI 설계 기술개발, 이동통신 부품 설계, 디지털 신호처리 등임



洪錫仁(正會員)

1946년 2월 17일생. 1968년 2월 고려대학교 공과대학 화학공학과 졸업. 1973년 2월 고려대학교 대학원 화학공학과 공학석사학위 취득. 1977년 9월 고려대학교 대학원 화학공학과 공학박사학위 취득. 1979년 3월 ~ 현재 고려대학교 화학공학과 교수. 주관심분야는 반도체 센서, 막분리, 생물공정의 설계, 해석 및 최적화