

빗살형 전극을 가지는 정전용량형 습도센서와 그 신호처리회로의 설계와 제작

論 文

50C-3-7

The Design and Fabrication of Capacitive Humidity Sensor Having Interdigit Electrodes and its Signal Conditional Circuitry

朴世光* · 姜正浩** · 朴鎮壽***
(Sekwang Park · Jeongho Kang · Jinsu Park)

Abstract - For the purpose of developing capacitive humidity sensor having interdigit electrodes, interdigit electrode was modeled and simulated to obtain capacitance and sensitivity as a function of geometric parameters like the structural gap and thickness. For the development of ASIC, switched capacitor signal conditioning circuits for capacitive humidity sensor were designed and simulated by cadence using 0.25um CMOS process parameters. The signal conditioning circuits are composed of amplifier for voltage gain control, and clock generator for sensor driving and switch control. The characteristics of the fabricated sensors are; 1) sensitivity is 9fF/%R.H., 2) temperature coefficient of offset(TCO) is 0.4%R.H./°C, 3) nonlinearity is 1.2%FS, 4) hysteresis is 1.5%FS in humidity range of 3%R.H. ~ 98%R.H.. The response time is 50 seconds in adsorption and 70 seconds in desorption. Fabricated process used in this capacitive humidity sensor having interdigit electrode are just as similar as conventional IC process technology. Therefore this can be easily mass produced with low cost, simple circuit and utilized in many applications for both industrial and environmental measurement and control system, such as monitoring system of environment, automobile, displayer, IC process room, and laboratory etc..

Key Words :sensor, humidity, capacitive, interdigit, ASIC

1. 서 론

화학센서의 일종인 습도센서는 가전기기, 과학계측, 생산공정, 환경제어 등에서 습도를 정밀하게 측정하여 제어하는데 사용되고 있으며, 고체전해질, 세라믹, 폴리머 등을 감습재료로 한 벌크형, 후막 및 박막형 센서가 제조되고 있다[1]. 기존의 폴리머를 이용한 정전용량형 습도센서는 습도 감지 폴리머에 습도가 투과할 수 있는 전극을 가지는 평행평판형이며, 감도변화가 크고, 기생용량의 영향이 적으나, 습도 투과용 전극의 형성과 감지막의 두께를 균일하게 형성하는 공정이 어렵고, 또한 고가의 제작장비가 필요하였다[2]. 따라서, 저가의 습도센서로 이온의 도전성을 이용한 저항변화형 습도센서와 다공질 감지막을 이용한 습도센서의 연구가 활발하게 이루어지고 있다[3].

폴리이미드는 1~3% 전후의 적절한 흡수율을 가지며, 체적저항율($10^{16} \sim 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$)이 매우 클 뿐만 아니라 동시에 내열성, 기계적 강도, 내약품성 등 내환경성이 우수하여 신뢰성이 높은 정전용량형 습도센서의 감습 재료로 사용할 수 있다[4].

본 논문에서는 이러한 폴리이미드를 감습 재료로 이용하여 빗살형 전극구조를 가지는 정전용량형 습도센서를 개발하였

다. 빗살형 전극 구조는 한번의 전극 형성 공정이 필요하므로 이전의 평행평판형에 비해 센서 제작이 용이하다. 또한, 고가의 장비를 이용한 습도 투과용 전극의 형성이 필요하지 않으며, 균일한 습도감지막 형성과 반도체 공정을 이용한 대량생산이 가능하다. 먼저 빗살형 전극의 두께와 간격과 폴리이미드의 두께에 따른 습도센서의 특성을 구하기 위해 유한요소법을 이용하여 습도센서의 정전용량과 감도를 계산하였다. 그 결과에 따라 전극의 간격과 두께 및 감습막의 두께를 결정하였고, 습도센서를 제작한 후 그 특성을 실험하고 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 폴리이미드는 습도감지 특성을 위하여 열처리가 수행되었다. 또한 센서와 신호처리회로의 집적화를 위한 선행연구로, 정전용량 변화를 전압으로 바꾸기 위한 신호처리회로를 설계하고 0.25um CMOS 공정을 이용하여 칩을 제작하였다.

2. 본 론

폴리이미드는 수분의 흡수에 따라 유전율이 변하므로 빗살형 전극간의 정전용량의 변화를 측정함으로써 상대습도를 검출할 수 있다[5,6]. 그림 1에 빗살형 전극을 가지는 정전용량형 습도센서의 구조와 레이아웃을 나타내었다.

2.1 센서의 설계

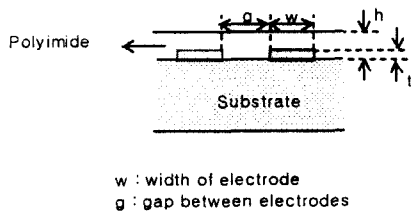
빗살형 전극의 두께와 간격 및 폴리이미드 감습막의 두께와 같은 센서의 구조가 정전용량과 습도에 따른 감도에 미치는 영향을 조사하기 위해 유한요소 해석을 수행하였다. 빗살형 전극간의 정전용량을 구하기 위하여 정전계 해석이 필요하며, 정전계의 기본 방정식은 포이슨(Poisson) 방정식으로

* 正 會 員 : 慶北大 電子電氣工學部 教授 · 工博
** 準 會 員 : 慶北大 大學院 電氣工學科 博士卒業 · 工博
*** 準 會 員 : 慶北大 大學院 電氣工學科 碩士課程
接受日字 : 2000年 11月 21日
最終完了 : 2001年 2月 20日

식 (1)과 같다.

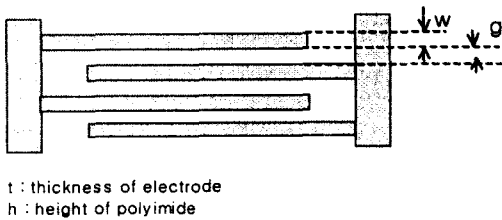
$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad \text{----- (1)}$$

여기서 V 는 양전극에 가해진 전위, ρ 는 전극간의 전하밀도, ϵ 은 감습막의 유전율을 나타낸다.



w : width of electrode
g : gap between electrodes

(a)



t : thickness of electrode
h : height of polyimide

(b)

그림 1. 빗살형 전극을 가지는 정전용량형 습도센서의 구조(a)와 레이아웃(b).

Figure 1. Cross view(a) and top view(b) of capacitive humidity sensor.

빗살형 전극은 그림 2와 같은 전극 구조가 반복해서 나타난다. 이 구조를 모서리 영역 (corner area)과 내부 영역 (inner area)으로 구분하고, 전극의 폭(w)과 전극의 간격(g)는 같다고 가정하고, 3차원 모델을 설정하여 정전계 해석을 수행하였다. 전극 주변의 전위 분포를 그림 3에 나타내었다. 전극간에 저장되는 전기 에너지(W)를 계산하고, 식 (2)로부터 정전용량을 구할 수 있었다.

$$C = 2W / (V_1 - V_0)^2 \quad \text{----- (2)}$$

여기서 V_0 와 V_1 은 각각 양전극에 가해지는 전압이다.

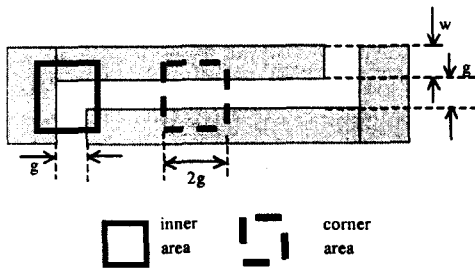


그림 2. 정전용량형 습도센서의 모델링.
Figure 2. Modeling of capacitive humidity sensor.

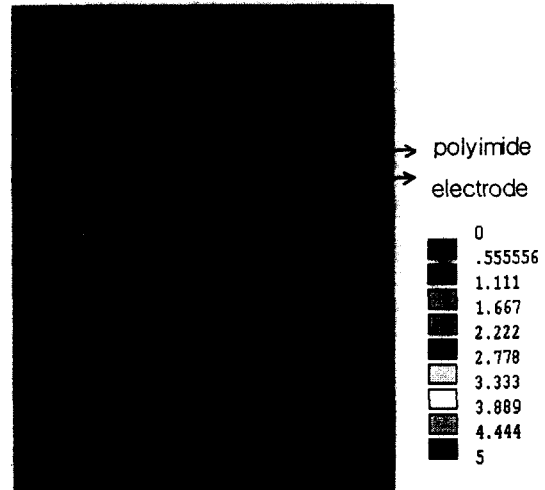


그림 3. 내부 모델의 전위 분포.

Figure 3. Distribution of electric potential in the inner area.

센서의 감도 S 는 $(C_{dry} - C_{wet})/100[\text{pF}/\%R.H.]$ 이 된다. C_{dry} 와 C_{wet} 은 각각 0%R.H., 100%R.H.에서의 정전용량을 나타낸다. 폴리이미드의 상대 유전율은 0%R.H.에서 3.2, 100%R.H.에서 4.0이고, 상대습도의 대부분의 범위(10~90%R.H.)에서 선형성을 가진다. 따라서 폴리이미드의 상대 유전율을 이용하여 시뮬레이션을 수행함으로써 C_{dry} 와 C_{wet} 을 얻을 수 있었다.

그림 4에 전극의 간격(g)과 두께(t)에 따른 습도센서의 정전용량과 감도를 나타내었다. 이 때 전극의 폭(w)과 간격(g)은 같다고 가정하였고, 감습막의 두께(h)는 10 μm 이다. 그림 5는 전극의 폭과 간격이 같고, 전극의 두께가 2 μm 일 때, 전극의 간격과 감습막의 두께에 따른 습도센서의 정전용량을 보여주고 있으며, 최대감도를 얻기 위한 감습막의 두께는 전극 간격의 2배임을 알 수 있다. 이는 이전에 발표된 논문과 일치한다[7].

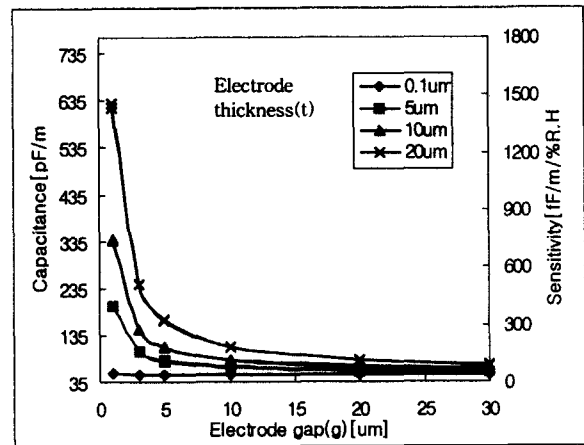


그림 4. 전극의 간격과 두께에 따른 정전용량의 변화와 감도.
Figure 4. Capacitance and sensitivity as a function of the gap and thickness of electrode.

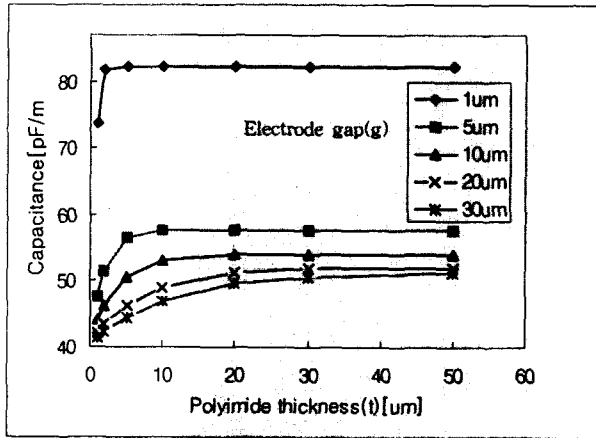


그림 5. 감습막의 두께와 전극의 간격에 따른 정전용량의 변화.

Figure 5. Capacitance as a function of the gap of electrode and thickness of polyimide.

2.2 제작과 실험

반도체 공정을 이용하여 정전용량형 습도센서를 제작하기 위하여, 시뮬레이션의 결과에 따라 빗살형 구조의 전극 형성을 위한 마스크를 제작하였다. 또한 설계 단계에서부터 공정의 복잡함을 제거하여, 타 정전용량형 습도센서는 2회의 전극 형성이 필요한데 비하여, 개발된 습도센서의 공정에서는 전극 형성 공정이 1회만 필요하므로 제조공정 상에서 간편하다는 큰 장점을 가지게 되었다. 20~30pF의 측정 가능한 정전용량을 얻기 위해 센서의 감지영역의 면적은 3mm × 3mm로 설정하게 되었다.

제작된 센서의 온도와 습도 응답을 얻기 위해 항온항습기(STH-702)를 사용하였다. 상대 습도에 따른 정전용량의 변화를 측정하기 위해 상대습도를 7%R.H.에서 98%R.H.으로 올렸다가 다시 7%R.H.로 내리면서 정전용량 측정회로를 이용하여 이 양단의 정전용량을 측정하였다. 또한 습도 특성의 온도 의존성을 조사하기 위하여 센서를 항온항습기에 넣어서 상대습도를 50%R.H.로 조절하고, 상온(약 25℃)부터 80℃까지 분위기 온도를 10℃씩 변화시키면서 센서, 센서가 장착된 회로 출력의 변화를 각각 시험하였다.

2.3 신호처리회로 설계

정전용량형 센서의 용량 변화는 대개 아주 미소하므로 센서와 측정회로간의 기생 커패시턴스가 큰 문제로 작용한다. 이와 함께 센서시스템의 소형화를 위해 센서와 인터페이스 회로의 집적화가 요구된다. 또한 미소 변이를 증폭하는 회로에서는 속도보다 정확도가 가장 우선 시 되고 따라서 증폭기의 입력 오프셋과 이득, CMRR 특성이 중요시된다. 특히 OP-AMP의 입력 오프셋을 줄이기 위하여 본 논문에서는 switched capacitor 회로를 사용하였다[8]. 본 회로는 auto-zeroed switched capacitor를 사용한 증폭회로로서 정전용량형 센서의 정전용량 변화를 측정하기 위한 목적으로 설계되었다.

그림 6에 auto-zeroed switched capacitor 회로를 사용한 정전용량형 습도센서의 신호처리 회로를 나타내었다. Switched capacitor 회로는 커패시터에 전하를 충전전시킴

서 구동된다. 이를 위해서는 서로 다른 위상을 갖는 두개의 클럭이 필요하다. 이 클럭들은 스위치들이 단락되지 않도록 클럭 상호간에 중첩되지 않는 구간이 있어야 한다. 또한 클럭 인가 시 지터링에 의한 에러를 감소시키기 위해 지연된 클럭이 필요하다. 그림 7은 설계된 비중첩 2위상 클럭 발생기의 구조를 보인 것이다. 기본적으로는 교차되는 RS 플립플롭이며, 비중첩 2위상 클럭의 비중첩 시간은 NOR 게이트와 두개의 NOT 게이트의 연산지연시간에 의해 결정된다. 또한 마지막 단의 4개의 NOT 게이트에 의해 지연된 두개의 클럭 (Vp1d, Vp2d)이 생기게된다. 설계한 신호처리회로의 성능을 검증하기 위하여 HSPICE를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

수 pF의 미세한 감도 변화를 갖는 정전용량형 습도센서의 구동회로를 위하여 switched capacitor 기법을 이용하여 아날로그 전압 출력을 갖는 신호처리회로를 설계하였고 SPICE를 이용하여 동작특성을 검증하였다. 클럭 주파수는 500kHz를 사용하였다. 그림 8에 습도센서의 구동회로를 시뮬레이션한 출력 파형을 나타내었다.

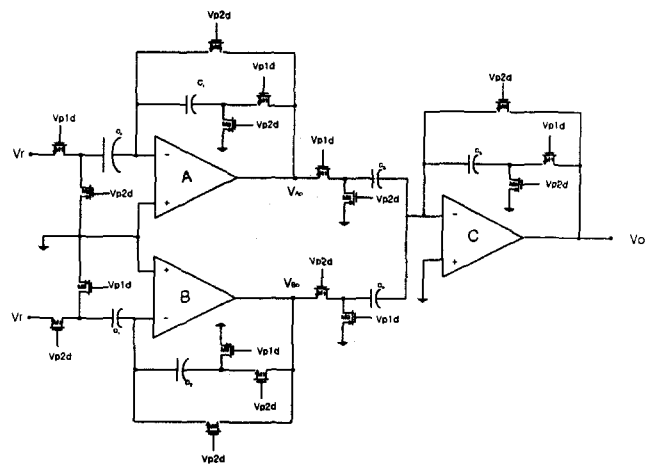


그림 6. 정전용량형 습도센서의 구동회로.

Figure 6. Circuit conditioning circuit diagram of capacitive humidity sensor.

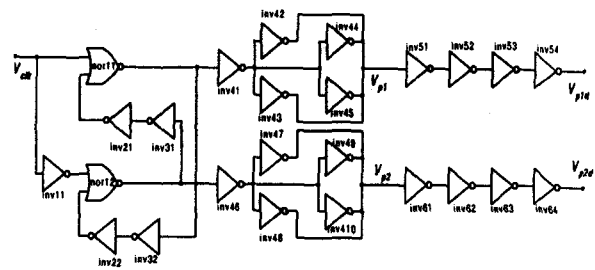


그림 7. 비중첩 2위상 클럭 발생기.

Figure 7. Nonoverlapping two-phase clock generator.

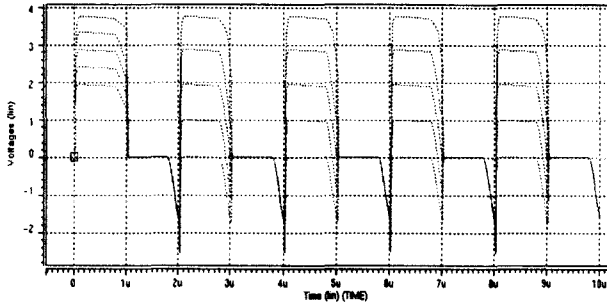


그림 8. 구동회로의 시뮬레이션 출력 파형
Figure 8. Simulated output of driving circuit.

3. 실험 결과 및 결론

그림 9에 제작된 센서의 사진과 그림 10에 습도 특성과 시뮬레이션 결과를 나타내었으며, 습도특성측정은 상온(21℃)에서 이루어졌다.

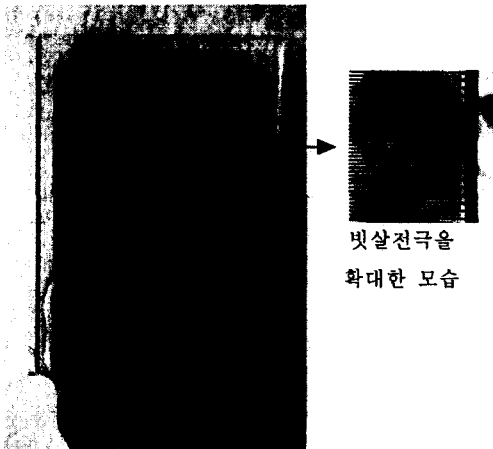


그림 9. 제작된 빗살형 전극 습도센서의 사진.
Figure 9. Photograph of the fabricated interdigital humidity sensor.

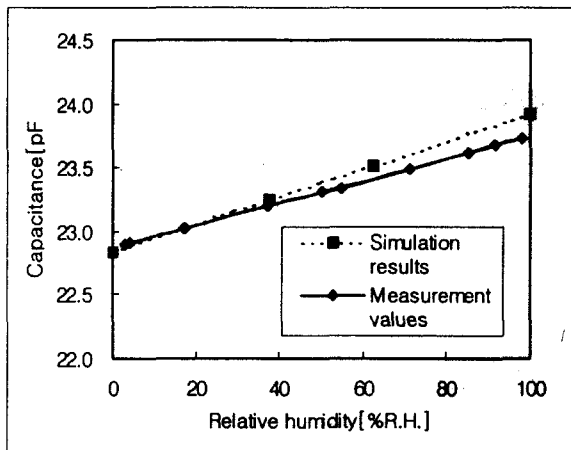


그림 10. 제작된 정전용량형 습도센서의 상대습도에 따른 정전용량 변화와 시뮬레이션 결과.
Figure 10. Simulation results and the fabricated sensor's measurement values to the change of relative humidity.

시뮬레이션 결과와 같이 정전용량은 저습에서 고습에 이르기까지 상대습도에 비례해서 선형적으로 증가하였으며, 습도 감도가 9fF/%R.H., 온도의존성이 0.4%R.H./℃, 선형성이 1.2%FS과 1.5%FS의 히스테리시스 특성을 나타내었다. 측정치와 시뮬레이션 결과와의 차이는 패드와 리드선의 기생용량 등의 이유로 보여진다. 센서 자체만의 실험값과 회로와 함께 측정한 경우를 비교하면, 감도는 동일하게 나타났으며, 오프셋(offset)은 회로와 함께 측정한 경우가 3%미만의 증가 현상이 나타났으며, 이는 구동회로의 입력부 기생용량에 의한 영향이다. 따라서, 두 경우가 큰 차이가 없고, 그림에 표시하면 겹치게 된다. 응답시간은 물분자의 흡착 시 약 50초, 탈착 시 약 70초로 나타났으며, 실험 결과를 그림 11에 나타내었다. 그림 12에는 30~80℃의 온도범위에서 제작된 빗살형 습도센서의 온도의존성 측정 결과를 나타내었다. 센서 자체의 온도의존성은 32fF/℃로 나타났고, 센서를 구동회로와 함께 측정한 경우 0.4%FS/℃의 온도 의존성을 보였다.

수 pF의 미세한 감도 변화를 갖는 정전용량형 습도센서의 신호처리를 위하여 switched capacitor 기법을 이용하여 아날로그 전압 출력을 갖는 신호처리회로를 설계하였고 SPICE를 이용하여 동작특성을 검증하였다. 클럭 주파수는 500kHz를 사용하였다. 그림 13에 제작된 칩의 사진을 나타내었다.

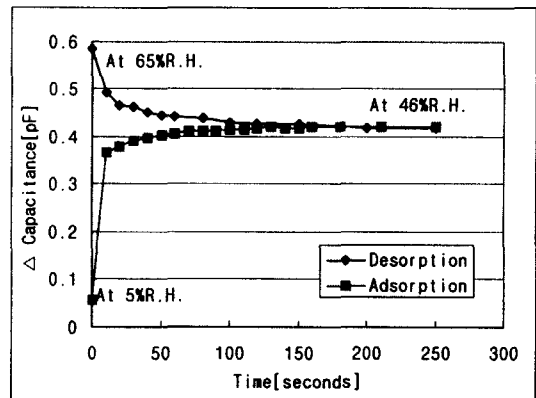


그림 11. 제작된 센서의 응답특성 실험결과.
Figure 11. Response time of fabricated sensor.

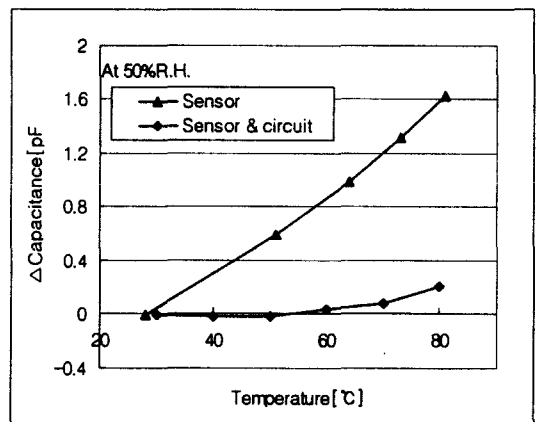


그림 12. 제작된 센서의 온도의존성 실험결과
Figure 12. Capacitance variance of the fabricated sensor to the change of temperature.

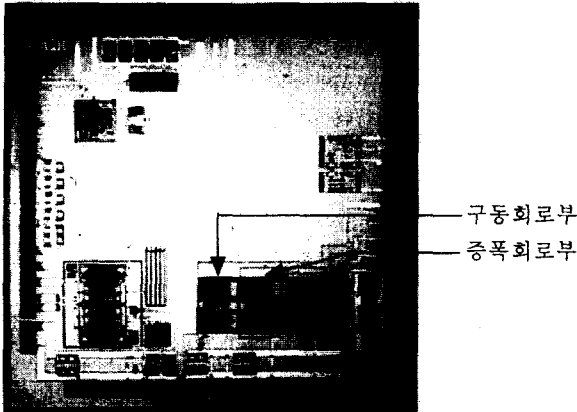


그림 13. 구동회로와 증폭회로의 칩 사진.
Figure 13. Chip photograph of the driving and differential amplifier circuit.

빗살형 전극은 습도센서 이외에도 많은 화학센서에서 이용되고 있고, 본 논문에서 제시한 유한요소법을 사용한 정전계 해석 방식은 이러한 빗살형 전극을 사용하는 다른 센서에도 적용이 가능할 것으로 보인다. 제작된 습도센서는 공정이 쉽고 간단하여 반도체 센서의 장점인 대량생산을 통하여 고정밀도의 센서를 저가에 공급이 가능할 것으로 보인다. 또한 주변회로의 ASIC화를 통하여 지능화, 고기능화, 소형화의 습도 검출기 제작이 가능하고, 사무실, 가정, 자동차 등의 생활 환경 제어에 활발한 이용이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 학국과학재단의 산학협력연구과제(경북대학교, 관리번호 : 20000709)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] 민남기, 김수원, 홍석인, "폴리이미드 박막을 이용한 투 칩 집적화 습도 센서", 전자공학논문지, 제 35권 D편 제 9호, pp.77~85, 1998.
[2] Wenmin Qu, Wojtek Wlodarski, "A novel multi-functional thin-film sensor for ozone, humidity and temperature", Transducers 99, pp.664~667, 1999.
[3] 최복길, 문남기, 유지호, 성영권, "전기화학적 처리에 의한 다공질 실리콘 산화막의 형성과 감습특성", 전기학회논문집, 제45권 제1호, pp.93~99, 1996.
[4] Andrew R.K. Ralston, Carl F. Klein, Paul E. Thoma and Denice D. Denton, "A model for the relative environmental stability of a series of polyimide capacitance humidity sensors", Sensors and Actuators B, pp.343~348, 1996.
[5] Hideo Shibata, Masahoro Ito, Masahoro Asakursa, and Kenzo Watanabe, "A digital hygrometer using a polyimide film relative humidity sensor", IEEE transaction on instrumentation and measurement, Vol. 45, No. 2, pp.564~569, 1996.
[6] H. Han, J. Seo, M. Ree, S. M. Pyo and C. C. Gryte,

"Water sorption and diffusion behaviors in thin film of photosensitive polyimides", Polymer Vol. 39, No. 13, pp.2963~2972, 1997.

[7] J. G. Korvink, T. Boltshauser, H. Baltes, "Accurate 3D capacitance evaluation in integrated capacitive humidity sensors", Sensors and Materials 4, pp.323~335, 1993.
[8] 박홍준, "CMOS 아날로그 집적회로 설계(하)", IDEC 교재개발 시리즈, pp. 906~908, 1999.

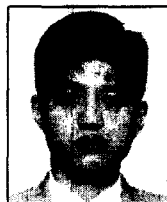
저 자 소 개



박 세 광 (朴世光)

1954년 10월 25일 생. 1976년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 미국 Case Western Reserve대 전기전자공학과 석사 졸업. 1988년 동 대학원 박사 졸업. 1998년~1989년 미국 LVAD Technology사 Project Leader.
현재 경북대 전자전기공학부 교수.

E-mail : skpark@knu.ac.kr



강 정 호 (姜正浩)

1968년 12월 19일 생. 1994년 경북대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업. 2001년 2월 동 대학원 전기공학과 박사 졸업.

E-mail : kangjho@yahoo.co.kr



박 진 수 (朴鎭壽)

1970년 12월 11일 생, 1997년 경북대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 석사졸업.

E-mail : huchi2243@hotmail.com