

# 폴리이미드를 감지층으로 이용한 정전용량형 습도센서 개발

홍성욱\*, 김영민\*\*, 윤영철\*\*\*

## Development of Capacitive Type Humidity Sensor using Polyimide as Sensing Layer

Soung-Wook Hong\*, Young-Min Kim\*\*, Young-Chul Yoon\*\*\*

**요약** 본 논문에서는 불소가 함유된 상용 폴리이미드를 사용하여 빗살형 전극을 갖는 정전용량형 습도센서를 제작하고 특성 측정 및 분석을 수행하였다. 먼저 상용 폴리이미드의 성분 분석을 위해 실리콘 웨이퍼 상에 패터닝을 하고 열처리 공정을 수행한 후 EDS 분석을 수행하였다. 분석 결과 탄소(C) 62.48 Wt%, 산소(O) 9.38 Wt% 그리고 불소(F) 성분이 평균 8.44 Wt% 포함되어있는 것을 알 수 있었다. IDT구조에 대한 설계값을 토대로 제작된 습도센서의 면적은  $1.56 \times 1.66 \text{mm}^2$ 이며, 전극의 넓이와 전극간 폭은 동일하게 각각  $3 \mu\text{m}$ , 센서의 감도를 높이기 위해 전극 수를 166개, 길이를  $1.294 \text{mm}$ 로 제작하였다. 제작된 센서에 대한 기본특성 측정 결과 감도는  $24 \text{ fF}/\% \text{RH}$ , 선형 특성  $\langle \pm 2.5 \% \text{RH}$  그리고 히스테리시스  $\langle \pm 4 \% \text{RH}$ 로 나타났으며, 주파수 특성은 10kHz, 20kHz, 50kHz, 100kHz에서 습도변화에 따른 용량값 변화를 측정한 결과 주파수가 증가할수록 동일 습도에서 용량값은 작아지는 것을 확인할 수 있었으며 10kHz와 100kHz의 습도변화에 따른 용량값 편차는 평균  $0.3 \text{ pF}$ 으로 측정되었다.

**Abstract** In this paper, we fabricated a capacitive humidity sensor with an IDT(Interdigitated) electrode using commercial polyimide containing fluorine, and its properties were measured and analyzed. First, in order to analyze the composition of commercial polyimide, EDS analysis was performed after patterning process on a silicon wafer. The area of the humidity sensor was  $1.56 \times 1.66 \text{mm}^2$ , and the width of the electrode and the gap between the electrodes were  $3 \mu\text{m}$  each. The number of electrodes was 166 and the length of the electrode was  $1.294 \text{mm}$  for the sensitivity of the sensor. The fabricated sensor showed that the sensitivity was  $24 \text{ fF}/\% \text{RH}$ , linearity  $\langle \pm 2.5 \% \text{RH}$  and hysteresis  $\langle \pm 4 \% \text{RH}$ . As a result of measuring the capacitance value according to the frequency change, the capacitance value decreased with increasing frequency. Capacitance deviations with 10kHz and 100kHz were measured as  $0.3 \text{ pF}$  on average.

**Key Words** : Capacitive type, Fluorine, Humidity sensor, Interdigitated structure, Polyimide

### 1. 서론

최근 4차 산업혁명과 함께 스마트 공장, 스마트 팜, 스마트 홈 등 사물 인터넷(IoT : Internet of Things)에 기반한 제품들이 출시되면서 소형, 고성능 저가형 센서에 대한 요구가 증대하고 있다.

특히 쾌적한 실내 및 근무 환경을 위한 습도의

자동제어는 일상생활에서의 삶의 질 향상을 위해 저비용 고성능의 습도센서에 대한 필요성을 요구 받고 있다.

습도 변화를 측정하기 위한 습도센서는 일상생활뿐만 아니라 계측기기, 자동차, 모바일 기기, 가전기기, 의료기기, 환경 기기, 산업기기 등 다

\*Department of Electronic Engineering, Catholic Kwandong University, Gangwon-Do, Korea.

\*\*R&D Center, MEMSChip Co., Ltd.

\*\*\*Corresponding Author : Department of Electronic Engineering, Catholic Kwandong University, Gangwon-Do, Korea. (ycyoon@cku.ac.kr)

Received August 07, 2019

Revised August 18, 2019

Accepted August 18, 2019

양한 분야에 적용되고 있으며, 다양한 응용 분야에서 소형, 고정밀 습도센서에 대한 중요성이 증대되고 있다[1-3].

현재 상용화되어 널리 사용되고 있는 습도센서로는 크게 저항형 습도센서와 정전용량형 습도센서로 구분할 수 있다. 저항형 습도센서는 구조가 간단하고 제조 공정이 간단하여 가격이 저렴한다는 장점이 있지만, 온도 보정이 필요하거나 낮은 습도의 측정이 어려운 단점을 가지고 있다. 정전용량형 습도센서는 낮은 습도의 감지가 가능하고 선형성 및 응답특성이 우수한 장점을 가지고 있지만, 저항형 습도센서에 비해 가격이 비싸다는 단점이 있다[4-6].

또한 정전용량형 습도센서는 폴리이미드의 감습 특성과 유전율을 이용하며, 기판에 하부 전극층과 폴리이미층 그리고 상부전극층이 적층 형태를 가지는 적층형 구조와 빗살 모양의 전극을 가지는 IDT(Interdigitated)구조 정전용량형 습도센서가 개발 및 상용화되고 있다. 그림 1은 상용화되고 있는 대표적인 정전용량형 습도센서 개념도를 보여주고 있다.

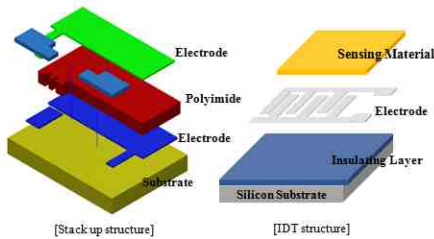


그림 1. 정전용량형 습도센서 개념도  
Fig. 1 The schematic structure of capacitive humidity sensor

적층형 구조인 경우 감도 특성이 좋고 기생용량이 적지만 공정이 복잡하고 고가이며, IDT 구조(빗살형)인 경우 공정이 단순하고 저가의 센서 제작이 가능하지만, 용량값 변화폭이 적어 감도가 상대적으로 낮고 센서 설계 시 기생용량을 고려해야만 한다[7-8].

본 논문에서는 화학적 습식 식각(wet etching)

이 가능하고, 불소를 함유하고 있는 상용 열경화성 폴리이미드를 수분에 대한 감습막으로 사용하고 ROIC(Read-Out Integrated Circuit)와 일체형 온·습도 복합센서 개발에 호환이 가능할 수 있도록 빗살형 정전용량형 습도센서 공정을 개발하고 센서를 제작하여 특성을 측정 및 분석하였다.

## 2. 본론

### 2.1 정전용량형 습도센서 감습막

일반적으로 폴리이미드는 강직한 방향족 주쇄를 기본으로 하는 열적 안정성을 가진 고분자 물질로 이미드 고리의 화학적 안정과 우수한 기계적 강도, 내화학성 및 내열성 그리고 절연 특성 및 낮은 유전율과 같은 뛰어난 전기적 특성 등으로 상용화되어 있는 대부분의 정전용량형 습도센서의 감습막으로 사용되어 오고 있다. 폴리이미드는 두 가지의 단량체(monomer)와 극성용매로 이루어진 폴리아미산(polyamic acid)을 화학적 또는 열적인 고분자화를 통해 얻어지는 고분자 물질로 유전상수를 낮게 유지하고 수분에 대한 안정성을 증대하고자 화학적인 반응성이 낮고 소수성을 띄는 불소 또는 염소 등의 7족 원소를 첨가하는 것으로 알려지고 있다[9].

그림 2는 대표적인 폴리이미드 전구체의 화학구조를 보여주고 있다.

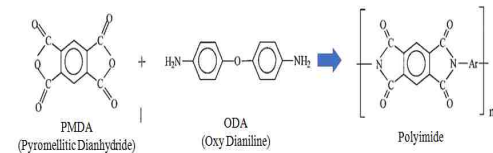


그림 2. 폴리이미드(Kapton) 화학구조  
Fig. 2. The Chemical Structure of Polyimide

정전용량형 습도센서의 감습재료로 사용되는 폴리이미드의 습도에 대한 특성과 유전 상수에 영향을 미치는 인자로는 화학적 근접성, 유리전이 온도, 불소함량, 자유불륨 등이 있다.

본 논문에서는 수분에 대한 안정성을 고려하여

불소를 함유하고 있는 상용 폴리이미드를 사용하여 정전용량형 습도센서의 감습막으로 사용하였다.

그림 3은 본 논문에 적용된 상용 폴리이미드를 실리콘 웨이퍼 상에 코팅 및 열처리를 수행한 후 불소 함유량을 확인하기 위해 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) 분석을 수행한 결과를 보여주는 것으로 분석 결과 탄소(C) 62.48 Wt%, 산소(O) 9.38 Wt% 그리고 불소 성분이 평균 8.44 Wt% 포함되어있는 것을 알 수 있었다.

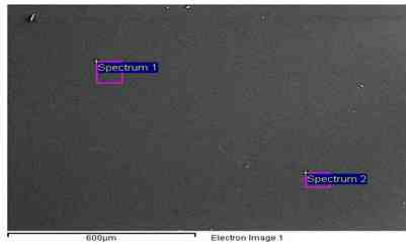


그림 3. 폴리이미드 감습막의 EDS 분석  
Fig. 3. The EDS analysis of polyimide

### 2.2 센서 설계 및 제작

그림 4는 빗살형 정전용량형 습도센서의 구조를 보여주고 있다. 빗살형 구조의 정전용량형 습도센서의 경우, 전극의 수, 전극의 두께와 간격 및 폴리이미드 감습막의 두께에 따라 정전 용량값과 습도에 따른 감도가 변하게 된다.

상대습도에 대한 감도 S는 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다[10].

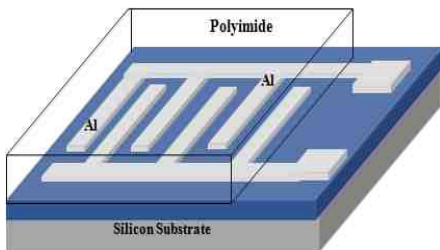


그림 4. IDT구조 정전용량형 습도센서 개념도  
Fig. 4. The schematic of IDT structure capacitive humidity sensor

$$S = \frac{\Delta C}{C_{dry}} \times \frac{1}{\Delta RH} = \frac{(\epsilon_{wet} - 1) \times C_{dry}}{\epsilon_{dry} C_{dry}} \times \frac{1}{\Delta RH} \quad (1)$$

여기서  $\epsilon_{dry}$ 과  $\epsilon_{wet}$ 는 각각 건조한 상태와 습도가 있는 상태에서의 유전율을 나타내며,  $C_{dry}$ ,  $C_{wet}$ 은 폴리이미드 유전율  $\epsilon_{dry}$ 과  $\epsilon_{wet}$ 에서의 정전 용량값을 나타낸다. 또한  $\Delta C$ 는 두 상태에서의 용량값 변화,  $\Delta RH$ 는 측정 습도(%RH) 구간을 나타낸다

그림 5는 정전용량형 습도센서의 빗살형 구조 개념도를 보여주는 것으로 J. Laconte, V.Wilmart 등은 정전 용량값 변화에 대해 폴리이미드 높이(h)와 전극 간격( $W_{Finger}$ ) 및 폭( $W_{gap}$ )의 관계를 시뮬레이션과 실험을 통해 최대 정전 용량값은 폴리이미드 높이가 전극의 간격과 폭을 합한 값과 같거나 그 이상에서 얻을 수 있음을 보여 주었다[11].

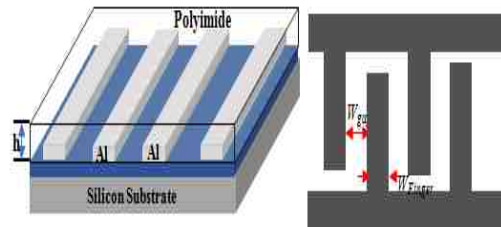


그림 5. 빗살형 구조 개념도  
Fig. 5. The schematic of IDT structure

빠른 응답특성을 얻기 위해서는 폴리이미드 두께(h)를 낮추어야 하며, 이를 위해서는 전극 간격과 폭의 합( $W_{Finger} + W_{gap}$ )을 반도체 포토 공정을 통해 가능한 작게 제작되어야 한다. 전극 간격과 폭의 합을  $6\mu m$ 로 설계하고 유전율 2.95, 체적저항을  $3.4 \times 10^{16} \Omega \cdot cm$ 로 내열성 및 내화학성이 우수한 열경화성 폴리이미드를 반도체 장비를 이용하여 코팅 및 패터닝 후 열처리를 통해 두께를 최적화하였다.

본 논문에서 설계된 IDT(Interdigitated) 구조의 정전용량형 습도센서는 폴리이미드 감습막과 반도체

체 공정 및 박막 공정을 이용하여 실리콘 웨이퍼 상에 제작되었다. 그림 6은 습도센서 제조 공정 흐름도를 보여주고 있다.

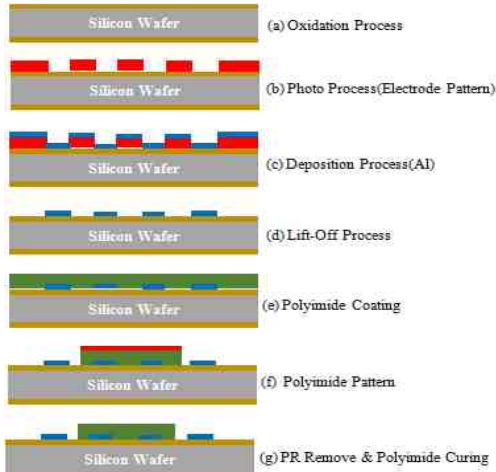


그림 6. 정전용량형 습도센서 제조공정  
Fig. 6. Fabrication Process of the capacitive humidity sensor

소자 제작은 p형 <100> 실리콘 웨이퍼 절연을 위해 열 산화(Oxidation) 공정을 이용하여 산화막을 5,000Å 두께로 성장하였다(그림 6(a)). 산화막 위에 LoF-2035 음성 감광제를 이용한 사진식각 공정을 수행하여 습도센서 전극패턴을 형성한 후, 패턴 내부의 잔류 포토레지스트(photoresist) 등을 제거하기 위해 플라즈마 장비(plasma asher)를 이용하여 패턴 내부 에칭(ashing)을 수행하였다(그림 6(b)). 이때 공정의 단순화를 위해 습도센서 전극 패턴과 패드 패턴을 동일 마스크 상에 설계 및 제작을 하였기 때문에 전극패턴과 패드 패턴을 동시에 형성하게 된다. 이후 금속 증착 장비를 이용하여 0.8~1μm 두께의 알루미늄을 증착(그림 6(c))한 후 아세톤을 이용한 Lift-Off 공정을 수행하여 전극 및 패드를 제조하였다(그림 6(d)). 그런 다음 전극의 전기적인 안정화를 위해 350℃, N<sub>2</sub> 분위기에서 30분 동안 열처리를 수행하였다. 그 후에 습도 감지막 형성을 위해 스핀 코팅(Spin Coating)을

이용하여 폴리이미드를 코팅하고 핫플레이트(Hot-Plate) 140℃, 3분 열처리한다. 폴리이미드 층 위에 양성 감광제를 이용하여 패턴 형성 및 식각을 수행하여 습도 감지층을 형성한다(그림 6(e)-(f)). 적용 폴리이미드는 감광제 현상액에 식각이 되는 상용제품을 사용하였으며 식각 후 아세톤에 감광제를 제거하고 세정한 후 열처리 장비에서 150℃에서 5분, 250℃에서 30분, 320℃에서 1시간 동안 N<sub>2</sub> 분위기에서 단계적으로 열처리 수행하여 고분자화를 수행하여 IDT구조 정전용량형 습도센서를 제작하였다(그림 6(g)).

그림 7은 제작된 IDT 구조 정전용량형 습도센서와 빗살 형태의 전극의 일부를 확대한 광학현미경 사진을 보여주는 것으로 제작된 습도센서의 면적은 1.56×1.66mm<sup>2</sup>이며, 전극의 넓이와 전극간 폭은 동일하게 각각 3μm, 센서의 감도를 높이기 위해 전극 수를 166개, 길이를 1.294mm로 설계 및 제작하였으며, 센서의 수분 감지특성 등을 고려하여 열처리 후의 폴리이미드의 두께가 6~8μm 범위에 있도록 하였다.

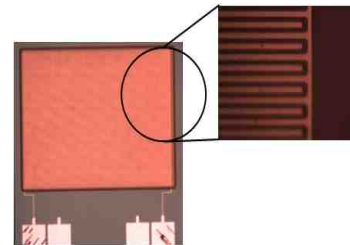


그림 7. 제작된 습도센서의 광학현미경 사진  
Fig. 7. Optical photograph of the fabricated humidity sensor

### 3. 실험 및 결과

#### 3.1 측정 시스템

그림 8은 제작된 습도센서의 특성을 측정하기 측정 시스템의 구성도를 보여주는 것으로써, 습도발생 챔버(모델 2500 Humidity Generator, Thunder Scientific Corporations), LCR 미터(모델 3532-50 LCR-HiTester, HIOKI) 그리고 데이터 수집을 위해 RS-232 케이블을 통해 LCR 메

터와 컴퓨터가 연결되어 프로그램이 구동하도록 구성하였다.

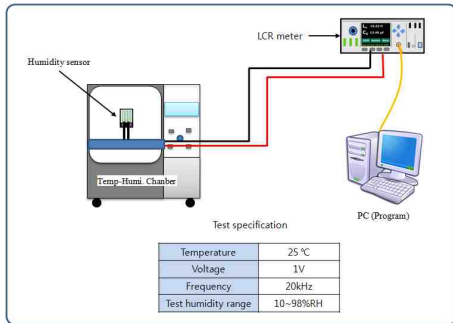


그림 8. 측정시스템 구성도  
Fig. 8. Schematic of the measurement system

### 3.2 측정 및 결과

센서의 선형 특성을 측정하기 위해 챔버 내에 센서를 삽입하고 LCR Meter를 통해 1V, 20kHz의 전원을 인가한 후 25℃에서 습도를 변화시키면서 정전용량값을 측정하였다. 그림 9는 센서의 감도 측정을 위해 20%RH에서 80%RH 범위까지는 20%RH 간격으로 상대습도를 올리면서 측정하였고, 90%RH와 95%RH 습도에서도 측정한 정전용량 변화값을 보여주는 결과 그래프이다.

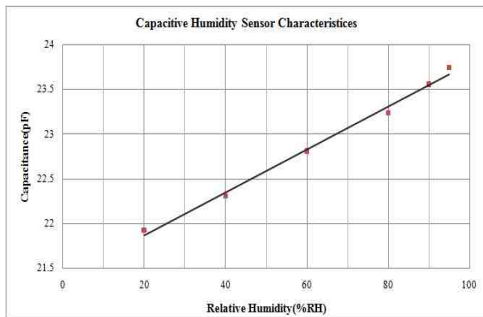


그림 9. 상대습도에 따른 용량값 변화  
Fig. 9. Capacitance variation vs. relative humidity

센서의 감도(S)는 식(2)와 같이 단순화하여 구할 수 있다.

$$S = \frac{C_h - C_l}{RH_h - RH_l} \quad (2)$$

여기서  $RH_h$ 와  $RH_l$ 은 습도변화 범위 내에서 고습에서의 습도와 저습에서의 습도를 각각 나타내며,  $C_h$ 와  $C_l$ 은  $RH_h$ 와  $RH_l$ 에서의 용량값을 각각 나타낸다.

제작한 센서의 감도는 측정 결과데이터로부터  $RH_{95}$ (고습)에서의 용량값( $C_{95}$ )과  $RH_{20}$ (저습)에서의 용량값( $C_{20}$ )이 각각 24.922pF과 23.742pF으로 측정되었으며, 식(2)로부터 20%RH에서 95%RH 범위에서의 센서의 감도는 24 fF/%RH로 계산되었다. 또한 측정값과 이론값과의 편차인 선형 특성은 20%RH에서 95%RH 영역에서  $\pm 2.5\%$ RH의 선형성을 보여주고 있음을 알 수 있었다.

그림 10은 일정한 온도(25℃)로 유지되어 있는 챔버에 센서를 삽입한 후 습도를 20 %RH에서 95 %RH까지 올리면서 정전용량값을 측정한 후 다시 20 %RH까지 습도를 내리면서 정전용량값을 측정한 센서의 히스테리시스 특성을 보여주는 그래프이다.

측정 결과 히스테리시스는 측정 습도 범위에서  $\pm 4\%$ RH 편차 이내로 다소 높게 측정되었는데, 이는 가습 및 제습 구간 측정 시 10분의 안정화 시간이 충분하지 못해 센서의 용량값 변화 폭이 크게 나타난 결과로 보여진다.

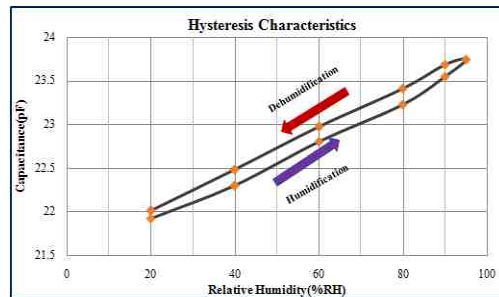


그림 10. 습도센서의 히스테리시스 특성  
Fig. 10. The hysteresis characteristics of humidity sensor

그림 11은 센서의 주파수 특성을 측정하기 위해 25℃ 분위기 챔버 내에 센서를 삽입하고 LCR

Meter를 통해 1V 전원을 인가한 후 각각의 주파수에서 습도를 변화시키면서 정전용량값을 측정할 결과 그래프를 보여주고 있다.

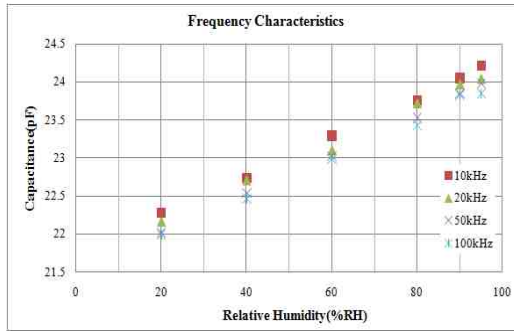


그림 11. 습도센서의 주파수 특성  
Fig. 11. The Frequency characteristics of humidity sensor

측정 결과 주파수 특성은 측정 습도 범위에서 10kHz와 100kHz의 용량값 편차는 평균적으로 0.3 pF 정도 낮게 측정되었으며, 각각의 주파수에서 습도 변화에 따른 용량값 변화를 보여주는 기울기는 평균 0.025 pF/%RH로 측정되었다.

#### 4. 결론

4차 산업혁명과 사물 인터넷에 기반한 스마트 홈 관련 제품들의 보급이 확대되면서 가정, 스마트 빌딩, 스마트 공장 등에서 쾌적한 실내환경을 위해 사용되는 냉난방기기 등의 에너지 소모를 최적화함과 함께 온도뿐만 아니라 습도 조절 기능까지 필요하게 되면서 고정밀 습도센서에 대한 요구가 증대하고 있다.

본 논문에서는 불소가 함유된 상용 폴리이미드를 사용하여 빗살형 전극을 갖는 정전용량형 습도센서를 제작하고 특성 측정 및 분석을 수행하였다. 제작된 습도센서의 면적은 1.56×1.66㎠이며, 전극의 넓이와 전극간 폭은 동일하게 각각 3㎠, 센서의 감도를 높이기 위해 전극 수를 166개, 길이를 1.294㎠로 설계 및 제작하였다. 센서특성 측정 결과 감도는 24 fF/%RH, 선형 특성 <math>\langle \pm 2.5\%RH ></math> 그리고 히스테리시스는 <math>\langle \pm 4\%RH ></math>로 나타

났으며, 주파수 특성은 10kHz, 20kHz, 50kHz, 100kHz에서 습도변화에 따른 용량값 변화를 측정하였다. 측정 결과 주파수가 증가할수록 동일 습도에서 용량값은 작아지는 것을 확인할 수 있었으며 10kHz와 100kHz의 습도변화에 따른 용량값 편차는 평균 0.3pF로 측정되었다.

제작된 IDT 구조의 정전용량형 습도센서는 기존의 적층형 정전용량형 습도센서보다 공정이 간단하면서 반도체 공정을 이용하여 대량 생산이 가능하며 사물인터넷 시대에 다양한 환경에서 온·습도 모니터링뿐만 아니라 고정밀 기기 분야에도 적용할 수 있으리라 기대된다. 또한 ASIC 제조를 위한 CMOS 공정과도 호환이 가능하여 향후 CMOS 일체형 온·습도 센서 제조에도 활용이 가능하리라 기대된다.

#### REFERENCES

- [1] Hamid Farahani, Rahman Wagiran and Mohd Nizar Hamidon, "Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review," *Sensors* 2014, vol. 14, pp. 7881-7939, 2014.
- [2] Cheng-Long Zhao, Ming Qin, Qing-An Huang, "A Fully Packaged CMOS Interdigital Capacitive Humidity Sensor With Polysilicon Heaters," *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 11, pp. 2986-2992, 2011.
- [3] Ming-qing Lij, Cong Wang and Nam-Young Kim, "High-Sensitivity and Low-Hysteresis Porous MIM-Type Capacitive Humidity Sensor Using Functional Polymer Mixed with TiO<sub>2</sub> MicroParticles," *Sensors*, vol. 17, 2017.
- [4] Taechang An, "Evaluation of DC Resistive Humidity Sensors Based on Conductive Carbon Ink," *J. Sensor*



*Sci.&Tech.* vol. 26, no. 6, pp. 397-401, 2017.

[5] Z. M. Rittersma, "Recent achievements in miniaturised humidity sensors-a review of transduction techniques," *Sens. Actuator A-Phys*, vol. 96, no. 2, pp. 196-210, 2002.

[6] Lei Gu, Qing-An Huang, and Ming Qin, "A novel capacitive-type humidity sensor using CMOS fabrication technology," *sensors and Actuators B*, vol. 99, iss. 2-3, pp. 491-498, 2004.

[7] Ji-Hong Kim, Byung-Moo Moon, and Sung-Min Hong, "Capacitive humidity sensors based on a newly designed interdigitated electrode structure," *Microsyst. Technol.*, vol. 18, pp. 31-35, 2012.

[8] Y.Y. Qiu, C. Azeredo-Leme, L.R. Alcácer, and J.E. Franca, "A CMOS humidity sensor with on-chip calibration," *Sensors and Actuators A*, vol. 92, pp. 80-87, 2001.

[9] Seung Woo Lee, Joo Young Kim, Se Jin Kwon, Hye Mi Seo, "Polyimide and Polimide Composite Films", *Polymer Science and Technology*, Vol. 24, No. 1, pp. 17-24, 2013

[10] Soung-Wook Hong, Young-Min Kim, Young-Chul Yoon, "The Interdigitated-Type Capacitive Humidity Sensor Using the Thermoset Polyimide", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 20, No. 6 pp. 604-609, 2019.

저자약력

홍 성 옥(Soung-Wook Hong)

정회원



- 1995년 2월 : 부경대학교 물리학과 (공학사)
- 2006년 2월 : 동대학원 음향진동학과 (공학석사)
- 2017년 ~ 현재 : 가톨릭관동대학교 전자공학과 박사과정 재학 중
- 2013년 7월 ~ 현재 : 아이소닉스 대표

〈관심분야〉 전자공학 응용, 센서, Sonar 시스템

김 영 민(Young-Min Kim)

정회원



- 1990년 2월 : 제주대학교 전자공학과 (공학사)
- 1997년 2월 : 동대학원 전자공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
- 2006년 8월~2007년 7월 : 성균관대학교 지능시스템연구센터 연구교수

• 2008년 10월 ~ 2015년 2월 : ㈜삼영에스앤씨 이사

• 2017년 1월 ~ 현재 : ㈜멤스칩 대표이사

〈관심분야〉 반도체, MEMS 센서&시스템, 전자공학

윤 영 철(Young-Chul Yoon)

정회원



- 1978년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학사)
- 1982년 2월 : 동대학원 전자공학과 (공학석사)
- 1989년 2월 : 동대학원 전자공학과 (공학박사)
- 1989년9월~현재 : 가톨릭관동대학교 전자공학과 교수

〈관심분야〉 RF 및 Microwave 회로설계