

열경화성 폴리이미드를 이용한 빗살전극형 정전용량형 습도센서

홍성욱¹, 김영민², 윤영철^{1*}

¹가톨릭 관동대학교 전자공학과, ²멤스칩 연구개발부

The Interdigitated-Type Capacitive Humidity Sensor Using the Thermoset Polyimide

Soung-Wook Hong¹, Young-Min Kim², Young-Chul Yoon^{1*}

¹Department of Electronic Engineering, Catholic Kwandong University

²R&D Center, MemsChip

요약 본 논문에서는 열경화성 폴리이미드를 정전용량형 습도센서의 감습재료로 사용하여 공정이 간단한 IDT(Interdigitated) 전극을 갖는 정전용량형 습도센서를 제작하고 특성을 측정 및 분석하였다. 먼저 일정한 용량값을 얻기 위하여 용량형 센서의 전극 수, 전극의 두께와 간격 및 폴리이미드 감습막의 두께 등을 최적화하여 마스크 설계 및 제작을 했으며, 실리콘 기판 상에 반도체 공정 장비를 이용하여 정전용량형 습도센서를 제작하였다. 제작된 센서의 면적은 $1.56 \times 1.66 \text{mm}^2$ 이며, 전극의 넓이와 전극간 폭은 동일하게 각각 $3 \mu\text{m}$, 센서의 감도를 위해 전극 수를 166개, 전극의 길이는 1.294mm 로 제작하였다. 그런 다음 센서 특성을 측정하기 위해 PCB상에 패키징 하였다. 25°C 챔버 환경에 센서를 삽입하고 LCR Meter에 연결하여 1V, 20kHz를 인가한 상태에서 20%RH에서 90%RH까지 습도변화에 대한 용량값 변화를 측정하였다. 제작된 정전용량형 습도센서의 측정 결과 감도는 $26 \text{fF}/\% \text{RH}$, 선형 특성 $\langle \pm 2\% \text{RH}$ 그리고 히스테리시스 $\langle \pm 2.5\% \text{RH}$ 를 얻을 수 있었다.

Abstract In this study, we fabricated a capacitive humidity sensor with interdigitated (IDT) electrodes using a thermosetting polyimide as a humidifying material. First, the number of electrodes, thickness, and spacing of the polyimide film were optimized, and a mask was designed and fabricated. The sensor was fabricated on a silicon substrate using semiconductor processing equipment. The area of the sensor was $1.56 \times 1.66 \text{mm}^2$, and the width of the electrode and the gap between the electrodes were each $3 \mu\text{m}$. The number of electrodes was 166, and the length of an electrode was 1.294mm for the sensitivity of the sensor. The sensor was then packaged on a PCB for measurement. The sensor was inserted into a chamber environment with a temperature of 25°C and connected to an LCR meter to measure the change in capacitance at relative humidity (RH) of 20% to 90%, 1 V, and 20 kHz. The results showed a sensitivity of $26 \text{fF}/\% \text{RH}$, linearity of $\langle \pm 2\% \text{RH}$, and hysteresis of $\langle \pm 2.5\% \text{RH}$.

Keywords : Interdigitated Structure, Polyimide, Thermoset, Capacitance, Humidity Sensor

1. 서론

상황인이나 지능형, 자동화 등의 특징을 가진 사물들이 특정 목적을 위해 네트워크로 연결되어 협업하는 기

술인 사물인터넷(Internet of Things : IoT)은 다양한 사물이 인간의 개입 없이 서로 통신하여 사람에게 고부가가치 복합서비스를 제공하는 제4차 산업혁명의 핵심기술로 발전하고 있다.

*Corresponding Author : Young-Chul Yoon(Catholic Kwandong Univ.)

Tel: +82-33-649-7553 email: ycyoon@cku.ac.kr

Received March 21, 2019

Revised April 16, 2019

Accepted June 7, 2019

Published June 30, 2019

Fig. 1은 IoT 주요 기술들을 보여주는 그림으로 센싱 기술, 유무선통신 및 네트워크 기술, 데이터 공유 및 플랫폼 기술, 단말기 기술 등으로 구성되어 있으며, 최근 다양한 센서의 발달로 물리적 세계에 대한 정보 수집이 가능해지고, 네트워크 기술의 발전으로 모든 사물이 연결되어 데이터 수집·분석·활용 등을 통해 다양한 응용서비스를 창출하고 있다.

센서란 측정 대상물로부터 압력, 온도, 습도, 가속도, 생체신호 등 정보를 감지하여 전기적 신호로 변환시켜주는 장치로 인간이 오감을 통해 주위 환경을 인지하고 파악하는 것처럼 다양한 전자기기에서 센서를 통해 정보를 취득하고 분석하므로 센서는 인간의 감각기관 역할을 수행하는 IoT의 핵심 요소이다.

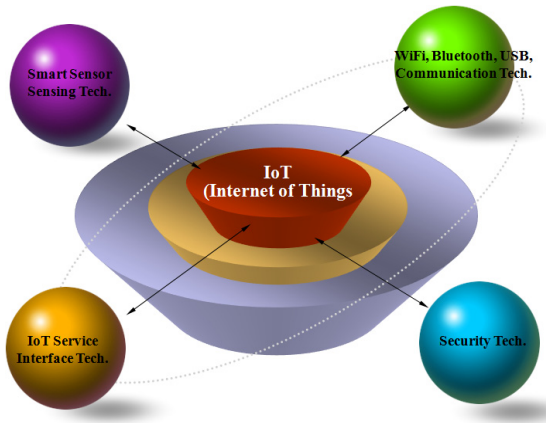


Fig. 1. The key technologies of IoT

MEMS(Microelectromechanical systems) 기술의 도입과 발전으로 센서는 소형화되고 복잡화되면서 단순 센싱 기능 이외에 데이터 처리, 의사 결정, 통신 기능 등이 결합되어 필요한 정보를 얻고 스스로 의사결정 및 정보 처리가 가능한 지능화된 센서로 발전하고 있다.

습도 변화를 측정하기 위한 습도센서는 일상생활뿐만 아니라 계측기기, 자동차, 모바일 기기, 가전기기, 의료기기, 환경 기기, 산업기기 등 다양한 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 저렴하다는 장점이 있지만, 온도 보정이 필요하거나 낮은 습도의 측정이 어려운 단점을 가지고 있다. 정전용량형 습도센서는 낮은 습도의 감지가 가능하

고 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 평행평판형과 빗살 모양의 전극을 가지는 IDT 정전용량형 습도센서가 개발 및 상용화되고 있다. 평행 평판형인 경우 감도 특성이 좋고 기생 용량이 적지만 공정이 복잡하고 고가이며, 빗살형인 경우 공정이 단순하여 저가의 센서 제작이 가능하다[7-8]

본 논문에서는 빗살형 정전용량형 습도센서를 제작하고 특성을 측정하였다. 먼저 전극의 수, 전극의 두께와 간격 및 폴리이미드 감습막의 두께 등을 최적화하여 마스크 설계 및 제작을 했으며, 실리콘 기판상에 반도체 공정장비를 이용하여 정전용량형 습도센서를 제작하였다. 그런 후 Wafer Sawing 및 PCB 상에 패키징하여 습도센서 특성을 측정하고 분석하였다.

2. 본론

2.1 설계 및 제작

2.1.1 정전용량형 습도센서 설계

Fig. 2는 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.

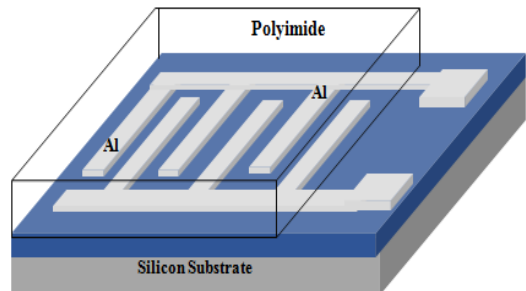


Fig. 2. Schematic of capacitive humidity sensor

건조한(dry) 환경과 습기가 존재하는(wet) 환경에서의 정전 용량값 비는 적층형 커패시터의 경우는 식 (1)과 같이 각각에서의 유전율의 비와 같다[9].

$$\frac{C_{wet}}{C_{dry}} = \frac{\epsilon_{wet}}{\epsilon_{dry}} \quad (1)$$

여기서 C_{dry} , C_{wet} 은 폴리이미드 ϵ_{dry} 과 ϵ_{wet} 에서의 정전 용량값을 나타내며, ϵ_{dry} 과 ϵ_{wet} 는 각각 건조한 상태와 습도가 있는 상태에서의 유전율이다. 또한 두 상태에서의 용량값 변화 ΔC 는 식 (1)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta C = C_{wet} - C_{dry}, \quad C_{wet} = \frac{\epsilon_{wet}}{\epsilon_{dry}} C_{dry}$$

$$\Delta C = \frac{\epsilon_{wet}}{\epsilon_{dry}} C_{dry} - C_{dry} = \left(\frac{\epsilon_{wet}}{\epsilon_{dry}} - 1\right) \times C_{dry} \quad (2)$$

Looyenga의 실험식에 의하면 흡습의 정도에 따라 폴리이미드의 유전율 ϵ_{wet} 이 변하게 되고 이는 전극 사이의 정전용량이 변하게 되며, 식 (3)과 같이 주어진다[10].

$$\epsilon_{wet} = \gamma \left(\epsilon_{water}^{\frac{1}{3}} - \epsilon_{dry}^{\frac{1}{3}} \right) + \epsilon_{dry}^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

여기서 γ 는 폴리이미드 내에 흡습된 물의 부분체적, ϵ_{dry} 는 측정 습도에서의 폴리이미드 유전율 그리고 ϵ_{water} 는 물의 유전율(=80)을 나타낸다. 그러므로 상대 습도에 대한 감도 S 는 식 (2)로 부터 구할 수 있다.

$$S = \frac{\Delta C}{C_{dry}} \times \frac{1}{\Delta RH} = \frac{\left(\frac{\epsilon_{wet}}{\epsilon_{dry}} - 1\right) \times C_{dry}}{C_{dry}} \times \frac{1}{\Delta RH} \quad (4)$$

여기서 ΔRH 는 측정 습도(%RH) 구간을 나타낸다 정전용량형 습도센서의 감습재료로 사용되는 폴리이미드의 습도에 대한 특성과 유전 상수에 영향을 미치는 인자로는 화학적 근접성, 유리전이 온도, 불소함량, 자외선 흡수 등이 있다. 반도체 제조 공정 분야에서 다양한 용도로 사용되고 있는 폴리이미드는 낮은 유전상수와 습기에 둔감한 성질을 요구하는 반면 습도센서의 감습재료로는 소수성(hydrophobic) 원소를 포함하지 않으면서 높은 감도의 특성을 가져야만 한다.

Fig. 3은 정전용량형 습도센서의 빗살형구조 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].

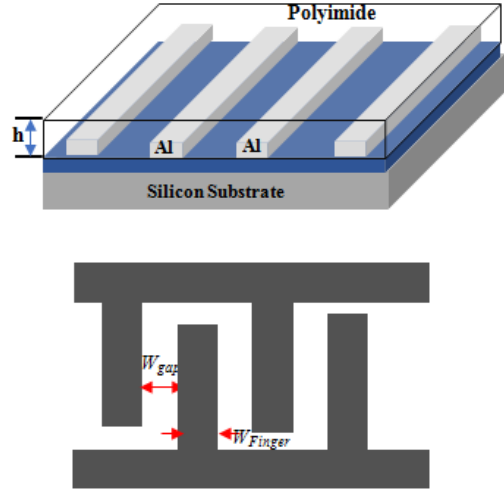


Fig. 3. Schematic of IDT sensor Structure

빠른 응답 특성을 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.

본 논문에서는 전극 간격과 폭의 합을 $6\mu m$ 로 설계하고 유전율 2.95, 체적저항율 $3.4 \times 10^{16} \Omega \cdot cm$ 로 내열성 및 내화학성 등이 우수한 열경화성 폴리이미드(HDMicrosystems 제조)를 반도체 장비를 이용하여 코팅 및 패터닝 후 열처리를 통해 두께를 최적화하였다.

2.1.2 정전용량형 습도센서 제작

본 논문에서는 6인치 (100)방향의 P-형 실리콘 웨이퍼를 기반으로 사용하여 IDT 구조를 갖는 정전용량형 습도센서를 제작하였다.

습도센서의 면적은 $1.56 \times 1.66 mm^2$ 이며, 전극의 넓이와 전극간 폭은 동일하게 각각 $3\mu m$, 센서의 감도를 위해 전극 수를 166개, 길이를 $1.294 mm$ 로 설계 및 제작하였으며 Fig. 4는 제작된 마스크를 이용한 IDT 구조의 정전용량형 습도센서 제조 공정을 보여주고 있다.

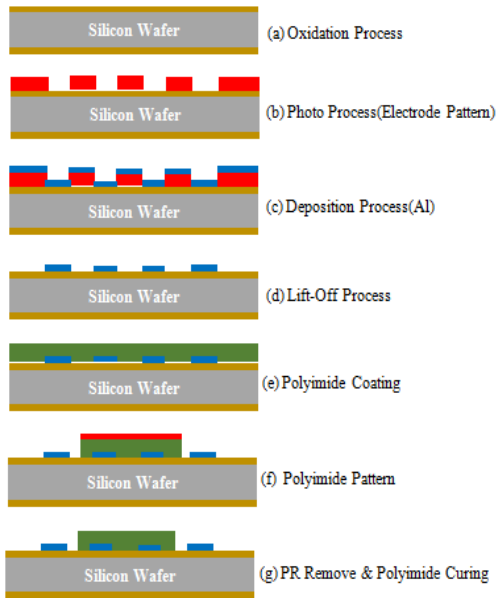


Fig. 4. Fabrication Process of the capacitive humidity sensor

소자 제작은 실리콘 기판 절연을 위해 열 산화(Oxidation) 공정을 이용하여 산화막을 5,000Å 두께로 성장하였다(Fig. 4(a)). 산화막 위에 사진식각 공정을 이용하여 전극 패턴을 형성한 후, 패턴 내부의 잔류 포토레지스트 등을 제거하기 위해 플라즈마 장비(plasma asher)를 이용하여 에싱(ashing)을 수행하였다(Fig. 4(b)). 이때 공정의 단순화를 위해 전극패턴과 패드 패턴을 동시에 형성하게 된다. 이후 열 증착 방법(E-beam evaporation)을 이용하여 1 μ m 두께의 알루미늄을 증착(Fig. 4(c))한 후 아세톤을 이용한 Lift-Off 공정을 수행하여 전극 및 패드를 제조하였다(Fig. 4(d)). 그런 다음 전극의 전기적인 안정화를 위해 350 $^{\circ}$ C, N₂ 분위기에서 30분 동안 열처리를 수행하였다. 그 후에 습도 감지를 위한 폴리이미드를 코팅하고 패턴을 형성한 후(Fig. 4(e)-(f)) 320 $^{\circ}$ C, N₂ 분위기에서 1시간 동안 열처리 수행하여 습도센서를 제작하였다(Fig. 4(g)).

Fig. 5는 제작된 IDT 구조 정전용량형 습도센서와 빗살 형태의 전극의 일부를 확대한 광학현미경 사진을 보여주고 있다.

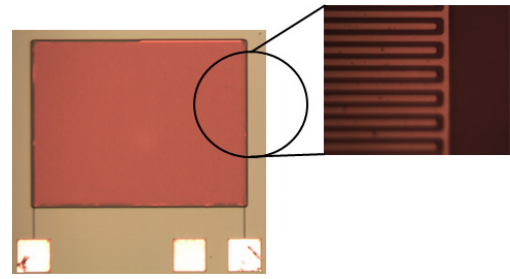


Fig. 5. Photograph of the capacitive humidity sensor

2.2 측정 및 결과

Fig 6은 제작된 정전용량형 습도센서를 PCB 위에 다이(Die) 및 와이어 본딩(Wire Bonding)을 수행한 후(Fig. 6(a)) 센서특성을 측정하기 위해 PCB 전극에 리드 핀(Lead Pin)을 납땀 방식으로 접합한 상태(Fig. 6(b))를 보여주고 있다.



Fig. 6. Fabrication Process of the capacitive humidity sensor

Fig. 7은 IDT 구조 정전용량형 습도센서의 특성을 측정하기 위한 측정시스템을 보여주는 것으로, 측정시스템 구성은 온도 및 습도 제어를 위한 온-습도 챔버와 습도

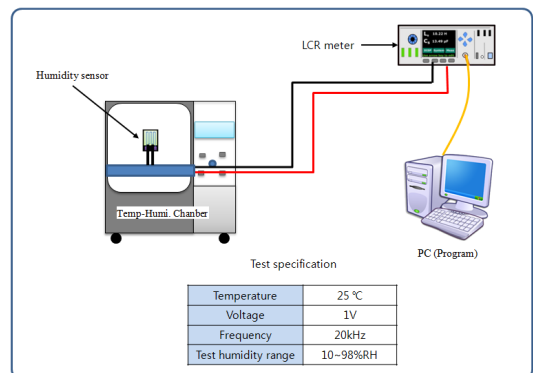


Fig. 7. Schematic of the measurement system

변화에 따른 정전용량값 변화를 측정하기 위한 LCR Meter 그리고 데이터 수집을 위해 RS-232 케이블을 통해 LCR Meter와 컴퓨터가 연결되어 프로그램이 구동하도록 하였다.

센서의 선형 특성을 측정하기 위해 챔버 내에 센서를 삽입하고 LCR Meter를 통해 1V, 20kHz의 전원을 인가한 후 25°C에서 습도를 변화시키면서 정전용량값을 측정하였다. Fig. 8는 20%RH에서 90%RH까지 습도를 올리면서 측정된 정전용량 변화값을 보여주고 있다. 측정 결과의 그래프를 통해 식(4)를 이용하여 식(5)와 식(6)의 다항식 형태의 감도 특성 수식을 얻을 수 있으며, 수식으로부터 20%RH에서 90%RH 범위에서의 센서의 감도는 26 fF/%RH로 IDT 구조 정전용량형 습도센서의 감도 특성을 나타냈으며, 선형 특성은 20%RH에서 90%RH 영역에서 $\pm 2\%$ RH의 선형성을 보여주고 있음을 알 수 있었다.

$$C(pF) = 0.026x + 21.34 \quad (5)$$

$$C(pF) = 2 \times 10^{-5}x^2 + 0.023x + 21.39 \quad (6)$$

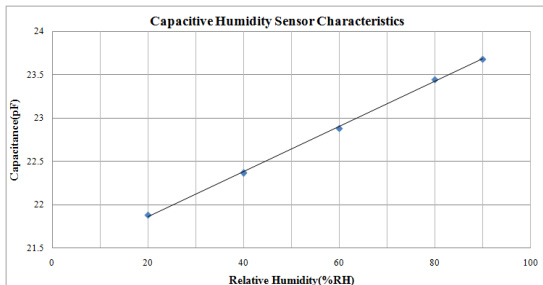


Fig. 8. Capacitance variation vs. relative humidity

Fig. 9는 일정한 온도(25°C)의 챔버에 센서를 삽입한 후 습도를 20%RH에서 90%RH까지 올리면서 정전용량값을 측정하고 다시 20%RH까지 습도를 내리면서 정전용량값을 측정하여 센서의 히스테리시스 특성을 보여주는 그래프이다.

각 습도 구간에서 20분 정도의 안정화 시간을 두고 측정을 하였으며, 측정 결과 히스테리시스는 20%RH에서 90%RH 영역에서 $\pm 2.5\%$ RH 편차로 좋은 특성을 보여주었다.

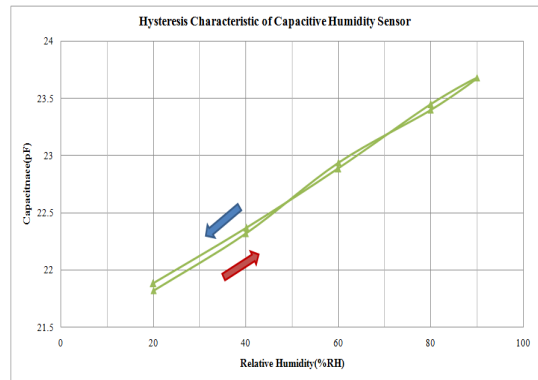


Fig. 9. The hysteresis of IDT capacitive humidity sensor

3. 결론

본 논문에서는 IDT 구조 정전용량형 습도센서를 6인치 실리콘 웨이퍼를 이용하여 제작한 후, 자체 제작한 PCB를 이용하여 패키징을 수행하여 센서특성을 측정하였다. 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 1.294mm로 설계 및 제작하였다. 센서특성 측정 결과 감도는 26fF/%RH, 선형 특성 $\pm 2\%$ RH 그리고 히스테리시스는 $\pm 2.5\%$ RH로 나타났다.

IDT 구조는 기존의 적층형 정전용량형 습도센서보다 공정이 간단하면서 우수한 특성을 보임으로써 반도체 공정을 이용하여 대량 생산이 가능하며 사물인터넷 시대에 다양한 환경에서 온-습도 모니터링뿐만 아니라 고정밀 기기 분야에도 적용할 수 있으리라 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. DOI : <https://doi.org/10.3390/s140507881>
- [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. DOI : <https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2154325>
- [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 TiO₂ MicroParticles,” Sensors, vol. 17, 2017.

DOI : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28157167>

- [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.
DOI : <https://doi.org/10.5369/JSST.2017.26.6.397>
- [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.
DOI : [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(01\)00788-9](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(01)00788-9)
- [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.
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.snb.2003.12.060>
- [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.
DOI : <https://doi.org/10.1007/s00542-011-1373-0>
- [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.
DOI : [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(01\)00543-X](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(01)00543-X)
- [9] J. Laconte, V. Wilmart, D. Flandre, and J-P. Raskin, “High-Sensitivity Capacitive Humidity Sensor Using 3-Layer Patterend Polyimide Sensing Film,” IEEE Sensors 2003, vol. 1, pp. 372-377, 2003.
DOI : <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2003.1278961>
- [10] H. Shibata et al., “A digital Hygrometer Using a Polyimide Film Relative Humidity Sensor,” IEEE Trans. Inst. and Meas., vol. 45, no. 2 pp. 564-569, 1996.
DOI : <https://doi.org/10.1109/19.492788>
- [11] J. Laconta, V. Wilmart, J-P. Raskin, and D. Flandre, “Capacitive Humidity Sensor Using A Polyimide Sensing Film,” Design. Test, integration & Packaging of MEMS/MOEMS, pp. 223-228, 2003.
DOI : <https://doi.org/10.1109/DTIP.2003.1287041>

홍 성 욱(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 : ㈜램스칩 대표이사

<관심분야>

센서 및 시스템, 전자공학 응용, 전자제어 시스템

윤 영 철(Young-Chul Yoon)

[정회원]



- 1978년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학사)
- 1982년 2월 : 동대학원 전자공학과 (공학석사)
- 1989년 2월 : 동대학원 전자공학과(공학박사)
- 1989년 9월 ~ 현재 : 가톨릭관동대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

RF 및 Microwave 회로설계