

## 메사구조를 갖는 다공질 실리콘 습도 센서

### Humidity sensors using porous silicon layer with mesa structure

진병현\*, 양규열, 김성진  
Byung-Hyun Jeon\*, Kyu-Yull Yang, Seong-Jeen Kim

경남대학교 전기전자공학부  
School of electrical & Electronics engineering, Kyungnam University

#### Abstract

A capacitance-type humidity sensors in which porous silicon layer is used as humidity-sensing material was developed. This sensors was fabricated monolithically to be compatible with the typical IC process technology except for the formation of porous silicon layer. As the sensors is made as a mesa structure, the correct measurement of capacitance is expected because it can remove the effect of the parasitic capacitance from the bottom layer and another junctions. To do this, the sensor was fabricated using process steps such as localized formation of porous silicon, oxidation of porous silicon layer and etching of oxidized porous silicon layer. From completed sensors, capacitance response was measured on the relative humidity of 25 to 95% at room temperature. As the result the measured capacitance showed the increase over 300% at the low frequency of 120Hz, and showed little dependence on the temperature between 10 to 40°C

**Key word(중요용어)** : humidity sensor, mesa structure, porous silicon, capacitance-type

#### 1. 서 론

대부분의 습도센서는 습도 변화량에 대한 고감도와 온도에 독립적인 출력 그리고 짧은 응답시간 특별히 오랜 기간 동안의 우수한 안정도와 적은 히스테리시스 현상을 가져야 한다. 또한 센서는 소형화와 집적화의 가능성을 제공하여야 한다. 일반적으로 습도를 검출하기 위한 감지 물질로써  $Al_2O_3$ ,  $Ta_2O_5$ ,  $TiO_2$ 와 같은 금속 산화물과 polyimid와 cellulose acetate와 같은 폴리머 막이 이용되어진다. 그러나 현재까지의 습도센서는 많은 응용 영역에의 필요와 오랜 연구 기간에도 불구하고 기초적인 요구를 충분히 만족시켜주지 못하고 있다. 금속 산화물을 이용한 센서는 일반적으로 알려진 것과 같이 폴리머에 비하여 제작이 어려우며, 유기 폴리머는 높은 습도에 노출시키면 팽창하는 경향이 있다.

다공질 실리콘은 1990년 상온에서 photoluminescence 현상의 발견 후 광전자 공학 응용에 특별한 관심을 받았으며, 센서 기술 분야에서 다공질 실리

콘의 사용과 그 넓은 내부 표면적에 대한 관심이 증가되었다. 1990년도에 보고된 다공질 실리콘을 이용한 상대 습도 감지 최초 연구에서 상대 습도가 0 - 100%로 변할 때 정전용량 응답은 440%증가되는 것이 관찰되었다. 일반적으로 다공질 실리콘 센서는 알려진 바와 같이 빠른 응답 시간과 상대적으로 넓은 표면 영역( $\sim 200m^2/cm^2$ )에 의한 높은 감도 그리고 마이크로 실리콘 기술을 이용한 집적화를 실현하는 장점을 제공한다. 특별히 다공질 실리콘은 수증기는 물론 알코올과 유기물 기체와 같은 가스에 대해 높은 흡착을 보이며, 다공질을 이용한 가스센서는 이와 같은 가스의 검출에 많은 관심을 받고 있다. 다공질 실리콘 멤브레인을 이용한 산소 가스의 측정 은 최근에 소개되어지고 있으며, 이는 화학적 산화 반응에 기초를 두고 있다.

본 연구에서는 IC기술에 의해 제작된 메사 구조를 갖는 습도센서를 제안하였다. 메사 구조에서 두 전극은 다공질 실리콘층의 양쪽에 직접적으로 배치되어지며, 그 결과 다른 층이나 접합으로부터의 기생 효과의 제한이 예상되어진다. 또한 습도센서의 제작 과정을 제시하였으며, 센서의 정전용량 응답 특성을

논의하였다.

## 2. 센서 제작 및 측정

다공질 실리콘 센서는 다공질 실리콘층을 형성하기 위한 양극 산화를 제외하고는 전형적인 실리콘 공정에 의해 제작되었다. 마이크로 구조를 갖는 다공질 실리콘을 형성하기 위해 저항율이 0.02Ω인 고농도로 도핑된 P<sup>+</sup>-type 100 실리콘웨이퍼를 사용하였다. 첫 공정은 인을 10<sup>15</sup>cm<sup>-3</sup>로 주입한 n-에피층을 성장하는 것으로 Fig1.(a)에 보였으며, 기관으로부터의 오토 도핑의 영향을 고려하여 1050°C에서 0.2μm/min의 속도로 성장시켰다. 성장된 에피층의 두께는 SRP(spread resistance profile)를 통하여 약 4μm가 되는 것을 확인하였다. 이온 주입법으로 붕소를 단위 면적당 10<sup>15</sup>cm<sup>-2</sup>정도로 주입하여 형성된 영역을 Fig1.(b)에 보였으며, 이 영역은 양극 산화 반응 후에 다공질 실리콘으로 변화된다. 다공질 실리콘층을 형성하기 위한 양극산화 반응은 에탄올이 혼합된 25% HF 용액 속에 13mA/cm<sup>2</sup>의 전류 밀도로 120초 동안 형성하였다. 형성과정 동안 n-영역은 포토 레지스트막으로 보호하였으며, 양극산화 후 Fig1.(d)에서 보인 것과 같이 LPCVD법으로 750°C에서 0.5μm두께의 질화막을 증착하였다. 40분 동안 습식 열산화법으로 다공질 실리콘 영역을 산화막으로 성장시키고, BOE(buffered oxide etchant)에서 산화된 다공질 실리콘 영역을 제거하여 Fig1.(f)와 같이 하부 전극을 형성하였다. 외부와의 차폐를 위하여 750°C에서 LPCVD법에 의해 산화막을 증착시키고 증기가 쉽게 침투할 수 있도록 30nm의 Cr/Au 전극을 스퍼터링으로 증착하였고, lift-off 공정으로 제거하였다. 마지막으로 Fig1.(j)와 같이 Al 금속화 공정으로 전극을 형성하고, 와이어 본딩하여 센서를 완성하였다.

측정은 항온항습조에서 LCR meter로 하였으며, 120Hz와 1, 10 그리고 100kHz에서 측정하였다. 상에서 25-95%의 상대습도 범위에 대해 30초 동안 노출시킨 후 정전용량 응답 특성을 측정하였다.

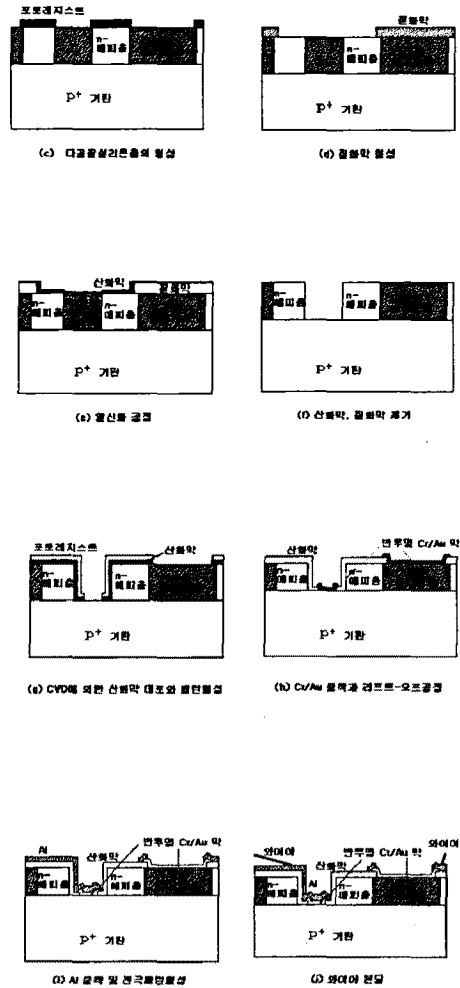
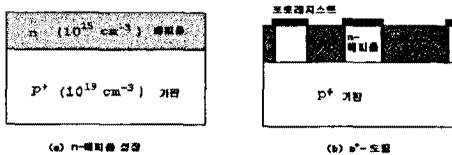
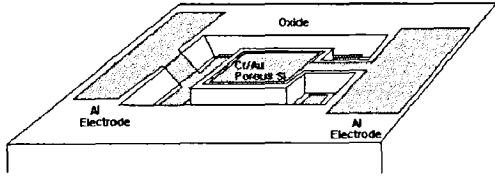


그림1. 습도 센서의 제작 공정 단계  
Fig 1. Process steps for fabricating humidity sensors

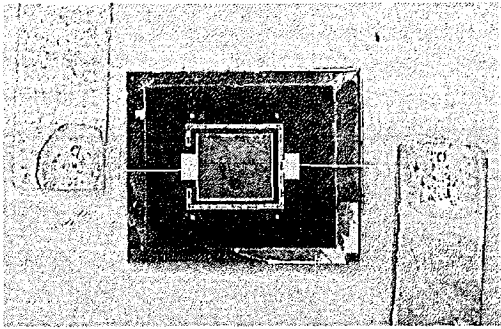
## 3. 결과 및 고찰

센서에서 다공질 실리콘층은 산화되어진 다공질 실리콘 산화물의 형성과 상대습도를 검출하기 위해 이용된다. 산화된 다공질 실리콘은 BOE에서 쉽게 식각되며, Fig.2에서 형성되어진 메시 구조를 보였다. Fig.2.(a)는 센서의 상부 구조 그림이며, Fig.2.(b)는 감지영역이 2.3×2.3mm<sup>2</sup>인 완성된 센서의

사진이다.



(a)



(b)

그림2. (a)센서의 상부 구조(b) 완성된 센서의 사진  
Fig 2. (a)Schematic diagram of the top view (b) photograph of the proto-type sensors

센서의 동작 원리는 수증기가 30nm의 Cr/Au 반투명전극을 통하여 다공질 실리콘층으로 침투할 때 다공질 실리콘층의 정전용량의 변화를 검출하는 것이다. 다공질 실리콘층은 수증기가 포함된 공기 중에 노출될 때 실리콘, 수증기, 기공이 혼재된 감지막의 총 유전특성 변화에 크게 의존하며, 다공질 실리콘층의 혼재된 유전 상수( $\epsilon'$ )는 주파수의 함수로서 각 물질의 체적비( $\delta_i$ )로 표현할 수 있다.

$$\epsilon'(f) = \sum_i \epsilon'_i(f) \delta_i; \quad (1)$$

Eq(1)에서 주어진 것과 같이 유전물질의 비유전율은 유전분산에 의해 인가된 a.c. wave의 주기에 따라 변화되어진다. 특별히 낮은 주파수에서는 배향 분극에 의해 더 많은 영향을 받으며, 액체나 가스에서 배향 분극은 영구적이거나 유도되어진 쌍극자 모멘트를 가진 매질 분자가 적용되어진 field에서

이동할 때 일반적으로 발생된다. 배향 분극에 의한 비유전율은 상대적으로 낮은 영구 쌍극자 모멘트의 완화시간에 의해 결정된다. a.c. wave의 주기는 분자의 정렬시간과 비교되며, Debye 분산식으로 정의되어진다.

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{(\epsilon_r - \epsilon_\infty)}{(1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{A}{kT} \quad (3)$$

여기에서  $\epsilon_r$ 은 정전계에 있어서 정적 유전율,  $\epsilon_\infty$ 은 고 주파수에 대한 광학적 유전율,  $\tau$ 는 영구 쌍극자의 완화시간, A는 유극성 분자의 점도와 관련한 상수이다. 그러므로 비유전율은 주파수의 증가와 온도의 감소에 따라 감소한다. Fig3는 센서로부터 측정된 습도의 감도이며, 다른 4개의 주파수인 120 Hz와 1, 10, 100kHz 상온에서 정전용량을 LCR meter로 측정하였다. 다공질 실리콘층의 정전용량 응답 특성은 상대습도에 크게 의존하며, 순수한 물의 유전율은 80, 실리콘의 유전율은 12정도이므로 다공질 실리콘의 다공성에 따라 100% 상대습도에서 400% 이상의 정전용량 값이 증가한다. 제작된 센서의 다공성은 35%이며 정전용량 변화는 다소 적게 나타났다. 실험에서 95%상대습도에 대한 정전용량은 300% 증가를 보였지만, 정전용량 응답곡선은 선형적이지 않았으며, 40%이하의 상대습도에서는 적은 변화를 보였다. 이 비선형적 정전용량 응답 곡선은 pore에 수증기가 응축되는 것에 기인하며, 낮은 상대습도에서는 수증기가 가스상태로 존재하지만, 고 습도에서 응축되어진다. Pore에서 응축은 모세관 현상에 의해 증기의 부분압이 포화 이하일 때 발생하며, 그 결과 pore에 응축이 시작될 때 정전용량은 급증하게 된다. 제작된 센서에서 곡선의 급증은 약 50% 상대습도에서 발생되었다. Fig4은 1kHz와 10 kHz주파수에서 10°C와 40°C에 대한 정전용량의 온도의존성을 보인 것으로, 큰 온도의존을 보이지는 않았다. 그러나 온도 증가함에 따라 상대습도와 같게 유지하기 위해 절대습도(i.e., 단위 체적당 수증기 밀도)는 증가하여야 한다. 따라서 수증기의 부분압은 온도 증가와 더불어 실제로 증가하며, 1kHz에서 곡선의 상승점은 저 습도의 방향으로 이동되어진다.

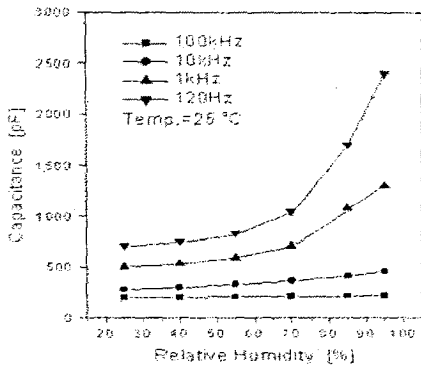


그림3. 주파수에 따른 정전용량 응답 특성  
Fig 3. Dependence of capacitance on relative humidity measured with different frequency at room temperature

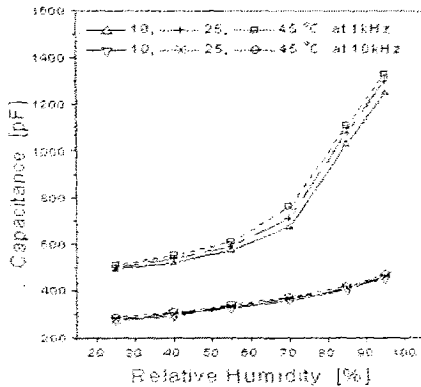


그림4. 온도에 따른 정전용량 응답 특성  
Fig 4. Dependence of capacitance on relative humidity measured with different temperature

#### 4. 결 론

상대습도 측정을 위하여 IC공정으로 다공질 실리콘을 이용한 메사형 습도센서를 제작하였으며, 낮은 온도 영역에서 양호한 감도를 보였다. 정전용량의 응답 특성은 상온에서 25-95% 상대습도 범위에 대하여 관찰하였다. 전 범위에서 비선형적인 응답 특성을 보였지만, 120Hz에서 300%이상의 정전용량의

증가를 관찰하였다. 이는 약 수십%의 정전용량 변화를 보이는 폴리머 습도센서와 비교되어지며, 따라서 다공질 실리콘 센서는 임계 습도에서 동작하는 습도-스위치의 응용이 기대된다. 또한 10-40°C에서 정전용량의 온도 의존성을 관찰하였으며, 결과적으로 정전용량 응답에 매우 적은 영향을 미치는 것을 관찰하였다.

#### 참고문헌

1. L.T. Canham, "Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers" *Appl. Phys. Lett.*, Vol 57 pp 1046-1048(1990)
2. R. C. Anderson, R.S. Muller and C.W. Tobias, "Investigation of porous silicon for vapour sensing", *Sensors and Actuators*, A21-23, pp.835-839(1990)
3. A. Richter, "design consideration and performance of adsorptive humidity sensors with capacitive readout", *The 7th international conf. on solid-state sensors and actuators*, pp.310-313(1993)
4. K. Watanabe, T. Okada, I. Choe, and Y. Satoh, "Organic vapor sensitivity in porous silicon device," *The 8th international conf. on solid-state sensors and actuators*, pp.890-893(1995)
5. S. j. Kim, B. H. Jeon, and K. S. Choi, "Capacitive-type organic gas sensors using porous silicon layer measurable at room temperature", *Chemical Sensors IV, Electrochemical Society Proceeding Vol.99-23*, pp.407-415(1999)
6. T. Taliercio, M. Dhiham, E. Massone, A. Foucaran, A.M. Gue, T. Bretagnon, B. Frasse, and L. Montes, "Porous silicon membranes for gas-sensors applications", *Sensors and Actuators*, A46-47, pp. 43-46(1995)
7. R. L. Smith and S. D. Collins, "porous silicon formation mechanisms", *J. Appl. Phys.*, Vol 71, pp R1-R22(1992)
8. W. Lang, et al., "porous silicon: a novel material for microsystem", *Sensors and Actuators*, Vol. A-51, pp.31-36(1995)