

## 다공질 실리콘층을 이용한 메사형 습도센서의 개발에 관한 연구

김성진

Study on the development of mesa-type humidity sensors  
using porous silicon layer

Seong-Jeen Kim

## 요약

본 연구에서는 다공질 실리콘층을 감습재료로 사용한 메사 구조를 갖는 정전용량형 습도센서를 제작하고 그 특성을 평가하였다. 센서의 구조적 특징은 기존의 웨이퍼 상하에 전극을 배치한 구조와 달리, 두 전극의 위치를 시료의 상부에 두도록 함으로서 집적화를 용이하게 할 뿐만 아니라, 하부 기판과 다른 접합영역으로부터 발생하는 정전용량의 영향을 차단하여 출력신호의 신뢰성을 개선하였다. 이를 위해 산화 다공질 실리콘의 형성과 빠른 에칭특성을 이용하여 메사 구조를 만들고, 다공질 실리콘층의 선택적 형성과 감광막을 마스크막으로 이용하여 다공질 실리콘층을 국부적으로 형성하였다. 그리고 완성된 시료에 대해 상온에서 55 - 90% 이상의 상대 습도 범위에서 감습특성을 측정하였다. 그결과, 습도가 증가했을 때 측정된 정전용량은 전체적으로 단조 증가하였으며, 120 Hz의 저주파수에서 측정했을 때 정전용량이 300%이상 증가하는 높은 변화를 보였다.

## Abstract

A capacitance-type humidity sensor with mesa structure in which porous silicon layer is used as humidity-sensing material is developed and its humidity sensing properties are measured. This sensor has a structure where two electrodes are set on the up-side of the wafer against the past typical structure having these electrodes on the up and down-side of the wafer. Therefore, the sensor can be fabricated monolithically to be more compatible with the IC process technology, and is possible to detect more correct output capacitance by removing the effect of the parasitic capacitance from the bottom layer and other junctions. To do this, the sensor was fabricated using process such as localized formation of porous silicon, oxidation of porous silicon layer, and etching of oxidized porous silicon layer. From the completed samples, the dependence of capacitance on the relative humidity of 55 to 90% more was measured at room temperature. As the result, the measured capacitance increased monotonously higher at the low frequency of 120 Hz, where the capacitance was observed to increase over 300%.

## 1. 서론

1990년도에 다공질 실리콘(Porous Silicon) 층에서 감습 효과에 대한 연구<sup>[1]</sup>가 발표된 이후, 넓은 표면적

을 활용한 다공질 실리콘 습도센서는 빠른 응답 시간, 습도 변화량에 대한 고감도의 반응 및 마이크로 실리콘 집적화 기술의 적용 등의 장점을 갖는 미래의 습도 센서로 연구되어 왔다.

\* 경남대 전자전기공학부(School of Electrical and Electronics Eng., Kyungnam Univ.)  
<접수일자 : 1998년 10월 26일>

지금까지 개발된 다공질 실리콘층을 이용한 정전용량형 습도 센서의 구조<sup>[1-3]</sup>는 실리콘 웨이퍼 기판의 상

하에 두 전극을 두고, 표면의 반투명 전극을 통해 침투한 습기에 의해 다공질 실리콘층의 유전 상수가 변하여 정전용량이 달라지는 원리를 이용하였다. 따라서 기존의 습도 센서는 웨이퍼의 전체 두께로부터 정전용량이 얻어지므로, 측정된 정전용량의 크기가 작아지고 다공질 실리콘층 이외의 하부 층과 다른 접합영역으로부터 추가적인 기생 성분들이 혼합되어 출력되므로 습도 변화에 의한 다공질 층의 정전용량의 변화를 정확하게 감지하는 것이 어려웠다. 그리고 다공질 실리콘층의 두께 조절을 위해 별도의 공정이 없어, 실제로 형성된 다공질 층은 수  $\mu\text{m}$ 에서 수십  $\mu\text{m}$ 정도로 두껍게 형성되어 감도를 높이기 위해서는 소자의 면적을 크게 할 수 밖에 없었다.

본 연구에서는 이러한 문제점들을 개선하기 위해 메사구조를 갖는 센서를 설계 및 제작하였다. 그리고 다공질 실리콘층의 두께를 효과적으로 제어하기 위해 기판위에 n-에피층을 성장하여 에피층의 두께를 갖는 다공질 실리콘층을 형성하였다. 여기에서 메사 구조를 만들기 위해 산화 다공질 실리콘의 형성과 빠른 에칭<sup>[4]</sup> 특성을 이용하였으며, 국부적으로 다공질 실리콘층을 형성하기 위해 도핑 농도에 따른 다공질 실리콘층의 선택적 형성<sup>[5-7]</sup>과 양극반응(anodic reaction)중에 HF용액에 대한 차단막으로 감광막 마스크막을 이용하여 시료를 제작하였다.

## 2. 시료 제작

### 2-1. 다공질 실리콘층의 형성

다공질 실리콘(porous silicon)층은 HF용액을 포함한 전해용액속에서 실리콘의 전기 화학적 반응을 통해 형성된다<sup>[8]</sup>. 이와 같이 다공질 실리콘층의 형성은 부식성이 강한 HF 용액속에서 진행되므로 양극 반응셀은 그림1과 같이 HF에 강한 테프론을 이용하여 제작하고, 전극은 백금을 이용하였다. 실리콘 웨이퍼의 양면은 O-ring에 의해 분리되어, 앞면은 HF용액에 접촉하게 하고, 웨이퍼 뒷면은 사용한 웨이퍼의 비저항이 낮기 때문에 오믹 콘택을 위한 별도의 알루미늄 증착공정없이 전해액인 염화칼륨(KCl)을 이용하였다. 그리고 HF 용액과 반응하면서 웨이퍼 표면에 잔류하는 부산물을 제거하기 위해 초음파 진동기를 이용하였다. 한편 종류수로 희석한 HF용액을 사용하면, 실리콘이 다공질화되면서 발생하는 수소 기포가 표면에 달라붙어 양극반응을 방해하므로 반응 용액이 표면에 용이하게 침투할 수 있도록 HF 용액속에 15% 이상의 에탄올을 첨가하였다.

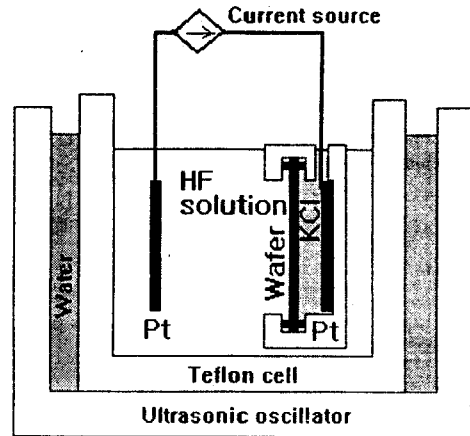


그림 1. 다공질 실리콘층의 형성을 위한 이중 양극반응 셀의 구조

Fig. 1. Double-well anodic reaction cell for forming porous silicon layer

본 연구에서 다공질 실리콘층은 센서의 구조를 메사 형태로 만들기 위해서 웨이퍼상에서 국부적으로 형성하는 것이 필요하다. 그러나 다공질 실리콘층은 강산성인 HF 용액속에서 양극 반응으로 형성되기 때문에 국부적인 형성이 용이하지 않고, HF용액에 견딜수 있는 특별한 마스크막이 요구된다. 일반적으로 테프론과 같은 고분자 폴리머류가 HF용액에 강하므로 포토레지스트를 마스크 막으로 이용할 수 있다<sup>[9]</sup>. 보통 10분 동안은 HF용액 속에서 거의 식각되지 않고 남아 있어, 두께가 수  $\mu\text{m}$ 의 다공질 실리콘층을 형성하기 위해 필요한 시간이 보통 3분 이내이므로, 포토레지스트의 손상은 거의 무시할 수 있다. 그러나 포토레지스트를 마스크막으로 사용할 경우에는 가장자리에서 언더커팅(undercutting)에 의해 측면 에칭이 심하게 일어나므로 본 연구에서는 다공질 실리콘의 형성에 대한 p<sup>+</sup>와 n영역사이에 반응 선택성을 추가로 적용하였다. 다공질 층을 형성은 웨이퍼 표면에 모인 정공밀도와 인가한 전류밀도에 비례하므로 비저항이 낮은 p<sup>+</sup> 영역이 비저항이 높은 p- 및 n-형 영역보다 빠르게 진행되므로 도핑농도 및 종류에 대해 반응 선택성을 보이게 된다. 따라서 마스크막의 사용과 도핑농도에 따른 반응 선택성을 이용하면 다공질층의 형성 영역을 p<sup>+</sup>-영역으로 더욱 제한시킬 수 있게 된다.

2-2. 습도 센서의 제작

본 실험에서는 다공질 실리콘층을 형성하기 위해 저항율이 아주 낮은 0.01 Ωcm 정도의 4인치 p<sup>+</sup>-형 단결정 실리콘 웨이퍼를 사용했다. 이렇게 비저항이 낮은 웨이퍼로부터 형성된 다공질 실리콘층은 다공의 직경이 작고 다공율(porosity)이 50% 내외로 표면적이 작은 단점이 있지만, 기계적인 안정도가 높기 때문에 여러 가지 후속 공정을 할 수 있다. 즉 다공질 위에 포토 레소공정을 위한 사진감광막을 입히거나, CVD공정으로 질화막이나 산화막을 도포하거나, 금속 박막을 증착하여도 다공질 층이 쉽게 부서지지 않고 내부로 침투하는 물질의 양이 거의 무시할 수 있을 만큼 작은 것으로 알려져 왔다<sup>[10]</sup>. 또한 다공질 실리콘을 형성하기 위한 양극반응 과정에서 웨이퍼의 뒷면에 오믹 접합이 되도록 별도의 금속 전극을 증착할 필요도 없게 된다.

고농도 p<sup>+</sup> 단결정 웨이퍼는 그림2(a)와 같이 인(phosphor)을 도핑한 n-에피층을 성장하였다. 도핑 농도가 낮을수록 반응 선택성이 증대되지만, 기판으로부터 오토 도핑의 영향을 고려하여 10<sup>15</sup> cm<sup>-3</sup> 정도로 도핑하였고, 1050℃의 온도에서 0.2μm/min의 속도로 두께가 약 3 μm가 되도록 성장하였으며, 에피층의 두께는 SRP(spreading resistance profile) 장비로 측정하였다. N-에피층은 후속공정에서 도핑 농도와 도판트의 종류에 의한 선택적 다공질 실리콘층을 형성할 때, 다공질 형성을 억제하는 층의 역할을 하게 되며, 또한 형성된 다공질 실리콘층의 두께를 결정하게 된다. 에피층 위에는 그림2(b)와 같이 국부적으로 다공질 실리콘층을 형성하기 위해 이온주입법으로 붕소(boron)를 단위 면적당 10<sup>15</sup> cm<sup>-2</sup> 정도로 주입하고, 질소가스 분위기속에서 1000 ℃의 온도에서 1시간동안 어닐링을 진행하여, 최소 비저항이 대략적으로 0.01Ωcm이 되도록 조절하였다. 결과적으로 시료의 표면은 p<sup>+</sup>와 n-영역으로 나누어지게 되며, 양극반응과정을 통해 다공질층은 반응 선택성에 의해 p<sup>+</sup>에 우세하게 형성된다. 본 연구에서는 효과적으로 p<sup>+</sup>-영역에만 다공질 실리콘층이 형성되도록 도핑농도에 따른 다공질층 형성의 선택성과 함께 HF용액에 강한 포토 레지스트를 마스크막으로 사용하여 국부적으로 다공질층을 형성하였다.

포토리지스트가 덮혀있는 시료는 에탄올이 첨가된 25% HF용액속에서 약 13 mA/cm<sup>2</sup>의 전류밀도에서 2분간의 양극 반응(anodic reaction)에 의해 다공질 실리콘층을 그림2(c)처럼 형성하였으며, 다공질 실리콘층

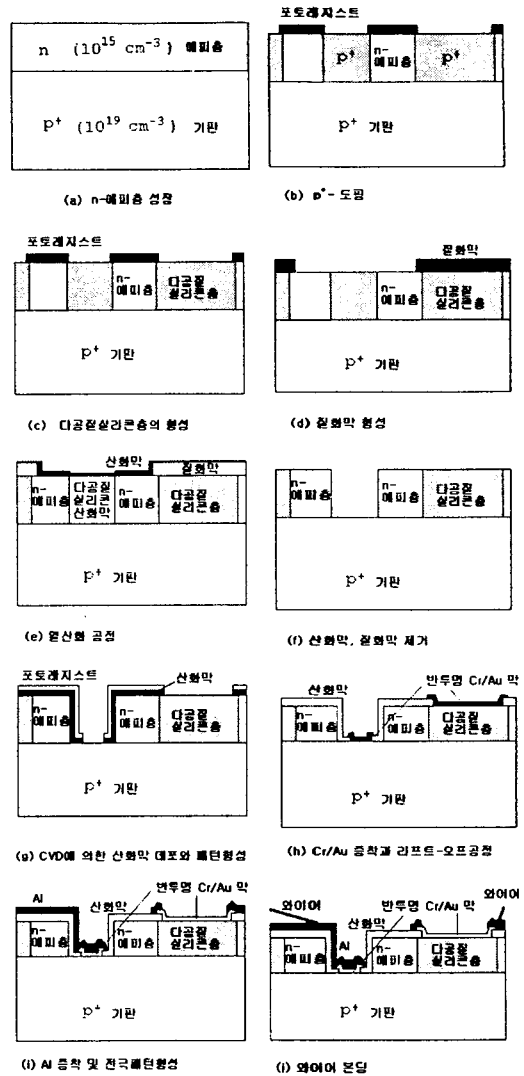


그림 2. 메사형 습도센서를 제조하기 위한 공정도  
Fig. 2. Process for fabricating mesa-type humidity sensors

이 형성된 후에는 질화막을 웨이퍼 전체에 도포하였다. 도포된 질화막은 그림2(d)와 같이 마스크를 이용하여 일부 다공질 실리콘층 영역을 제외하고는 에칭하였다. 그리고나서 그림2(e)와같이 습식 열산화법으로 산화막을 성장하였다. 이 과정에서 열산화공정에 노출된 다공질 실리콘층은 짧은 시간에도 표면 깊숙히 산화 다공질 실리콘막으로 변환된다. 이렇게 열산화 과정에서 형성된 표면의 산화막과 산화 다공질 실리콘층 및 보호막으로 사용된 질화막을 제거함으로써 시료는 그림2(f)

와 같이 고농도 기관층이 외부로 노출된 메사형 구조가 된다. 또한 표면에 감습부인 다공질 실리콘층이 드러나게 되므로, 그림2(g)와 같이 외부와 차폐시키기 위해 PECVD법으로 산화막을 5000Å의 두께로 도포하였다. 여기에서 PECVD공정은 도판트의 재분포에 영향을 주지않도록 저온공정으로 온도가 700℃에서 진행하였다. 그리고나서 포토리소공정을 통해 콘택구멍(contact holes)과 감습 창을 연 후에 크롬(Cr)과 금(Au)으로 두께가 300Å이하의 반투명전극이 형성되도록 진공증착하였고, 증착된 후에 그림2(h)와 같이 리프트-오프 방법으로 필요없는 금속을 제거하였다. 그리고나서 외부 전극에 연결하기 위해 그림2(i)와 같이 알루미늄으로 전극 패드를 만들고 최종적으로 그림2(j)와 같이 와이어 본딩을 진행하여 소자를 완성하였다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서 다공질 실리콘은 감습물질로서 뿐만 아니라 열산화에 의해 산화막을 신속하게 형성하고 또한 형성된 다공질 실리콘 산화막을 에칭 용액(BOE)속에서 쉽게 제거되는 점을 이용하여 메사 구조를 갖는 습도 센서를 제작하였다.

그림3은 그림2(g)에 나타난 콘택구멍을 형성하는 공정에서 콘택 구멍을 만들기위해 리프트-오프용 포토레지스트에 패턴이 형성된 후에 사진이다. 그림3에서 보여지는 것처럼 하부전극을 만들기 위해 산화 다공질 실리콘층이 에칭된 지역에서 큰 단차가 관측되고 있다. α-step 장비로 약 3.5 μm의 단차를 확인할 수 있었으며, 이는 형성된 다공질 실리콘층의 두께와 짧은 산화 시간에서도 다공질 실리콘층속으로 산화과정이 아주 깊숙하게 진행되었음을 알 수 있게 한다. 그리고 에칭한 경계면에서 n-형 에피층 영역 쪽으로 좀더 에칭된 것이 보여지는 데, 이는 언더 커팅에 의해 부분적으로 n-형 에피층으로도 다공질 실리콘층이 형성되어 나타난 것으로 추정된다. 그림4는 와이어 본딩까지 마친 시료의 사진이다. 2개의 알루미늄 전극 패드와 중앙에는 크기가 2.0x2.0 mm<sup>2</sup>인 정방형의 크롬과 금으로 증착된 반투명 전극층이 보이며, 이면을 통해 통과한 습기가 소자의 정전용량에 변화를 일으키게 한다. 순수한 물의 유전율이 80, 실리콘의 유전율이 12 정도이므로 다공질 실리콘층에 습도가 높아지면, 정전용량 값이 증가하게 된다. 그리고 시료는 다공질 실리콘, 물 및 기공이 혼재된 유전체이므로 배향분극 뿐만아니라 계면에서 전하의 이동이 방해받게 되어 분극이 발생하는 계면분극(interfacial polarization)을 고려해야 한다. 계면분극은 일반적으로 낮은 응답 속도를 갖는다.



그림 3. 콘택 홀을 형성하기위한 포토리소 공정을 마친 후에 시료의 사진 (다공질 실리콘 산화막이 에칭되어 형성된단차가 보인다)

Fig. 3. Figure of a sample after the photolithography process for forming contact holes (the valley formed by etching the porous silicon oxide is shown.)

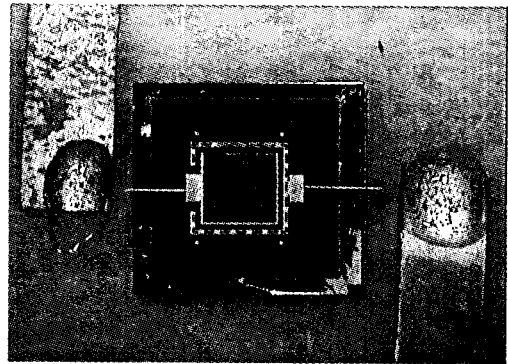


그림 4. 완성된 메사형 습도센서의 사진

Fig. 4. A completed mesa-type humidity sensor

본 실험에서는 120Hz, 1, 10 및 100 KHz의 4 가지 표준 주파수에 대해서 LCR Meter (모델명: HP4263A)를 이용하여 습도에 따른 정전용량의 변화를 측정하였다. 주파수가 높을수록 유전분극의 응답 지연으로 정전용량의 크기는 감소했으나, 반면에 주파수가 낮을수록 흡착된 물과 다공질 실리콘사이에 경계면 분극에 의한 유전분산 효과로 출력 신호의 변동(fluctuation)이 심하게 나타났다. 결과적으로 제작된 시료에 대해서 상대습도를 55%에서 90%이상으로 증가시켰을 때, 변화된 정전 용량의 크기는 그림5와 같은 결과가 얻어졌다. 기존의 습도센서<sup>[2]</sup>에 비해 시료의 면적이 작아도 큰 정전용

량과 높은 정전용량의 변화를 얻을 수 있었으며, 이는 다공질 실리콘층의 두께를 작게 하고 기생 정전용량의 효과를 줄인 결과라 예측된다. 그리고 낮은 주파수와 고습에서 정전용량의 가파른 상승은 다공질 층내에서 큰 유전상수를 갖는 물에 대한 유전분극이 증대되고, 공기가 점유하는 체적이 극소로 감소하게되고 대부분 물과 다공질 실리콘으로 구성된 유전체로부터 경계면 분극 효과가 크게 나타나기 때문으로 추정된다.

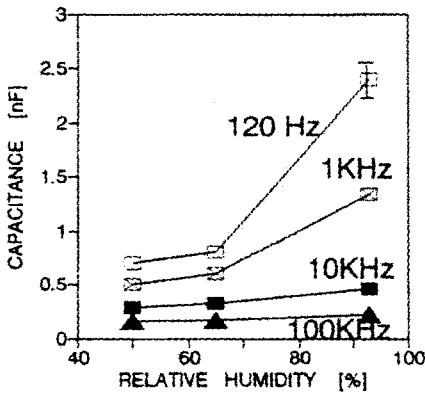


그림 5. 주파수를 달리하여 측정된 상대습도와 정전용량 사이의 관계

Fig. 5. Dependence of capacitance on relative humidity measured with different frequencies

#### 4. 결론

본 연구에서 개발한 다공질 실리콘층을 이용한 습도센서는 기존의 웨이퍼 상하에 전극을 갖는 구조 대신에 집적화 센서로 제작이 가능하도록 상부에 2 전극을 갖는 메사형 습도센서로 제작하였다. 이를 위해 산화 다공질 실리콘의 형성과 에칭특성 및 국부적으로 다공질 실리콘층을 형성하기 위해 반응 선택성과 포토리소그래피를 마스크막으로 활용하여 소자를 제작하였다. 이 습도센서는 불필요한 하부층으로부터 추가적인 정전용량의 효과를 제거할 수 있고, 에피층의 두께로 다공질 실리콘층의 두께를 조절할 수 있어 균일한 다공질 실리콘의 형성과 소자의 크기를 줄일 수 있는 장점이 기대된다. 제작된 시료로부터 상온에서 상대 습도와 LCR meter의 표준 주파수의 변화에 따른 정전용량을 측정 한 결과, 큰 정전용량과 높은 정전용량의 변화를 얻을 수 있었으며, 그러나 낮은 주파수와 고습에서 경계면 분극의 증가로 정전용량의 가파른 상승이 관측되었다.

#### 감사의 글

고농도 p<sup>+</sup>-실리콘 기판을 제공하고 에피층을 성장해 주신 삼성전자(은양공장)의 신관수 부장과 박천만 주임, 시료의 제작공정에 참여한 경남대 석사과정 이주혁과 한국과학기술원 박사과정 이내인, 와이어본딩과 다이커팅에 도움을 주신 경북대 손병기, 최시영 교수님께 감사드립니다.

※ 본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비 (반도체 97-E-4030)에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

- [1] R.C. Anderson, et. al., " Investigations of porous silicon for vapour sensing", *Sensors & Actuators*, A21-23, pp. 835-839 (1990)
- [2] A. Richter, "Design considerations and performance of adsorptive humidity sensors with capacitive readout", *The 7th international conf. on solid-state sensors and actuators*, pp.310-313 (1993)
- [3] K. Watanabe, et. al., "Organic vapor sensitivity in a porous silicon device," *The 8th international conf. on solid-state sensors and actuators*, pp.890-893 (1995)
- [4] T. Unagami, "Oxidation of porous silicon and properties of its oxide film", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.19, pp. 231-241 (1980)
- [5] M. Ligeon, et. al., "Application of porous silicon formation selectivity to impurity profiling in p-type silicon substrates", *J.Appl.Phys.*, vol. 66, pp. 3814-3819 (1989)
- [6] M. Kruger, et. al., "Formation of porous silicon on patterned substrates", *Thin Solid Films*, Vol.276, pp.257-260 (1996)
- [7] R. L. Smith and S. D. Collins, "Porous silicon formation mechanisms", *J. Appl. Phys.*, Vol. 71, pp. R1-R22 (1992)
- [8] T. Unagami, "Formation mechanism of porous silicon layer by anodization in HF solution", *J. Electrochem. Soc.*, Vol.127, pp.476-483 (1980)

- [9] P. Steiner and W. Lang, "Micromachining applications of porous silicon", Thin Solid Films, Vol.255, pp.52-58 (1995)
- [10] W. Lang, et. al., "Porous silicon: a novel material for microsystems", Sensors and Actuators, Vol. A-51, pp.31-36 (1995)

---

 著 者 紹 介
 

---



## 김성진(金成振)

1961년 1월 16일생.

1983년 고려대 전기공학과 졸업,

1985년 동대학원 석사과정 졸업,

1993년 동대학원 박사과정 졸업,

1994년 ~ 1999년1월 현재 경남대학교 전기전자공학부 조교수.

주관심분야: 반도체 센서 및 센서 집적화