

다공질 실리콘층을 이용한 정전용량형 습도센서의 개발

김성진*, 이주혁*, 윤여경*, 최복길**
*경남대학교 전기전자공학부 **공주대학교 전기공학과

Development of Capacitance-type Humidity Sensors Using Porous Silicon Layer

Seong-Jeen Kim*, Ju-Hyuk Lee*, Yeo-Kyung Yoon*, Bok-Gil Choi**

* Sch. of Electrical and Electronics Eng., Kyungnam University

** Dpt. of Electrical Eng., Kongju National University

Abstract

A capacitance-type humidity sensor using porous silicon layer is developed. The unique property of this sensor is a structure which has electrodes on the surface of the wafer like a general IC device. 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. The measurement of humidity-sensing ability was done for two type of sensors using porous silicon layer formed in 25 and 35% HF solutions, respectively. As the result, the former sensors showed larger value and variation of capacitance for the relative humidity.

1. 서론

다공질 실리콘을 이용한 습도 센서⁽¹⁻²⁾는 넓은 표면적과 실리콘 기술을 적용할수 있다는 점에서 최근에 많은 연구가 되어 왔다. 기존의 폴리머 혹은 세라믹을 이용한 습도 센서와 비교한다면, 다공질 실리콘 습도 센서는 특히 1) 고감도, 2) 수 초이내의 빠른 응답 시간, 3) 소형화, 및 4) 실리콘 IC기술의 적용과 마이크로 센서의 제작 용이한 점에서 탁월한 장점을 갖고 있다. 그러나 오랜 시간에 걸쳐 개발과 다양한 응용분야에 필요성에도 불구하고 습도 센서는 일부를 제외하고는 쉽게 상품화가 되지 않고 있다. 이는 습도의 변화를 상대적으로 전기신호로 변환하기가 어렵고, 습기에 직접 노출로 인한 감지물질의 내구성 저하, 주위 온도에 따른 상대 습도의 변화와 보상의 고려, 고습에서 저습으로 측정하고자 할 때 잔류 습기에 의한 히스테리시스 효과등의 문제가 습도 센서의 개발 및 생산을 저해시킨 요인이 되어왔다.

지금까지 개발된 다공질 실리콘층을 이용한 정전용량형 습도 센서의 구조는 실리콘 웨이퍼 기판의 상하에 두 전극을 두고, 표면의 반투명 전

극을 통해 침투한 습기에 의해 다공질 실리콘층의 유전 상수가 변하여 정전용량이 달라지는 현상을 이용하였다. 따라서 기존의 습도 센서는 다공질 실리콘층뿐만 아니라 웨이퍼의 전체 두께로부터 정전용량이 얻어지므로, 측정된 정전용량의 크기가 작아지고 다공질 실리콘층 이외의 허부층과 다른 접합영역으로부터 추가적인 기생 성분들이 혼합되어 출력되므로 습도 변화에 의한 다공질 층의 정전용량의 변화를 정확하게 감지하는 것이 어려웠다.

본 연구에서는 이러한 문제점들을 개선하기 위해 집적회로용 소자처럼 다이오드의 두 전극을 상부에 두도록 하는 습도센서를 설계 및 제작하였다. 이를 위해 산화 다공질 실리콘의 형성과 빠른 에칭⁽³⁾특성을 이용하였으며, 국부적으로 다공질 실리콘층을 형성하기 위해 도핑 농도에 따른 다공질 실리콘층의 선택적 형성⁽⁴⁻⁵⁾과 양극반응(anodic reaction)중에 HF용액에 대한 차단막으로 포토레지스트 마스크막을 이용하여 시료를 제작하였다. 그리고 다공질 실리콘층을 25%와 35%의 농도가 다른 HF용액속에서 형성한 후에 시료를 제작하여 감습특성을 측정하고 비교하였다.

2. 다공질 실리콘층의 형성

다공질 실리콘(porous silicon)층은 HF용액을 포함한 전해용액속에서 실리콘의 전기 화학적 반응을 통해 형성된다. 양극 반응셀은 HF에 강한 테프론을 이용하여 제작하고, 전극은 백금을 이용하여 하였다. 실리콘 웨이퍼의 양면은 o-ring에 의해 분리되어, 앞면은 HF용액에 접촉하게 하고, 웨이퍼 뒷면은 사용한 웨이퍼의 비저항이 낮기 때문에 오믹 콘택을 위한 별도의 알루미늄 증착공정 없이 전해액인 염화칼륨(KCl)을 이용하였다.

본 연구에서 다공질 실리콘층이 웨이퍼상에서 국부적으로 형성하는 것이 필요하다. 이를 위해 HF용액에 견딜수 있는 포토레지스트를 마스크 막으로 이용하였다⁽⁶⁾. 그러나 포토레지스트를 마스크막으로 사용할 경우에는 가장자리에서 언더컷팅(undercutting)에 의해 측면 에칭이 심하게 일어나므로 본 연구에서는 다공질 실리콘의 형성에 대한 p⁺와 n⁻영역사이에 반응 선택성을 추가로 적용하였다. 따라서 마스크막의 사용과 도

평농도에 따른 반응 선택성을 이용하여 다공질층의 형성 영역을 p^+ -영역으로 더욱 제한적으로 형성시켰다.

3. 습도 센서의 제작

본 실험에서는 다공질 실리콘층을 형성하기 위해 저항율이 아주 낮은 0.01 Ω cm 정도의 4인치 p^+ -형 단결정 실리콘 웨이퍼를 사용했다. 고농도 p^+ 단결정 웨이퍼는 그림 1(a)와 같이 인을 도핑한 n-에피층을 성장하였다. 도핑 농도가 낮을수록 반응 선택성이 증대되지만, 기판으로부터 오토도핑의 영향을 고려하여 10^{15} cm^{-3} 정도로 도핑하였다. 에피층 위에는 그림 1(b)와 같이 국부적으로 다공질 실리콘층을 형성하기 위해 이온주입법으로 붕소를 단위 면적당 10^{15} cm^{-2} 정도로 주입하고, 어닐링하였다. 결과적으로 시료의 표면은 p^+ 와 n-영역으로 나누어지게 되며, 양극반응과정을 통해 다공질층은 반응 선택성에 의해 p^+ 에 우선하게 형성된다. 본 연구에서는 효과적으로 p^+ -영역에만 다공질 실리콘층이 형성되도록 도핑 농도에 따른 다공질층 형성의 선택성과 함께 HF 용액에 강한 포토 레지스트를 마스크막으로 사용하여 국부적으로 다공질층을 형성하였다.

포토레지스트가 덮혀있는 시료는 에탄올이 첨가된 25와 35% HF용액속에서 약 13 mA/cm^2 의 전류밀도에서 2분간의 양극 반응(anodic reaction)에 의해 다공질 실리콘층을 그림 1(c)처럼 형성하였으며, 다공질 실리콘층이 형성된 후에는 질화막을 웨이퍼 전체에 도포하였다. 도포된 질화막은 그림 1(d)와 같이 마스크를 이용하여 일부 다공질 실리콘층 영역을 제외하고는 에칭하였다. 그리고 나서 그림 1(e)와 같이 습식 열산화법으로 산화막을 성장하였다. 이렇게 열산화 과정에서 형성된 표면의 산화막과 산화 다공질 실리콘층은 희석된 HF용액속에 담구어서 제거하고, 보호막으로 사용된 질화막을 제거함으로써 시료는 그림 1(f)와 같이 고농도 기판층이 외부로 노출된 구조가 된다. 또한 표면에 감습부인 다공질 실리콘층이 드러나게 되므로, 그림 1(g)와 같이 외부와 접촉시키기 위해 PECVD법으로 산화막을 5000Å의 두께로 도포하였다. 그리고 나서 포토리소공정을 통해 콘택구멍(contact holes)과 감습창을 연 후에 크롬(Cr)과 금(Au)으로 두께가 300Å 이하의 반투명전극이 형성되도록 진공증착하였고, 증착된 후에 그림 2(h)와 같이 리프트-오프 방법으로 필요없는 금속을 제거하였다. 그리고 나서 외부 전극에 연결하기 위해 그림 1(i)와 같이 알루미늄으로 전극 패드를 만들고 최종적으로 그림 1(j)와 같이 와이어 본딩을 진행하여 소자를 완성하였다.

4. 결과 및 고찰

순수한 물의 유전율이 80, 실리콘의 유전율이 12 정도이므로 다공질 실리콘층에 습도가 높아지면, 정전용량 값이 증가하게 된다. 그리고 시료는 다공질 실리콘, 물 및 기공이 혼재된 유전체

이므로 배향분극 뿐만 아니라 계면에서 전하의 이동이 방해받게 되어 분극이 발생하는 경계면 분극(interfacial polarization)을 고려해야 한다. 본 실험에서는 각각 25 및 35%의 HF용액속에서 형성된 다공질 실리콘층을 이용하여 시료를 제작하였으며, 여기에 감습 특성을 측정하기 위해 120Hz와 10 KHz의 두 가지 표준 주파수에 대해서 LCR Meter (모델명: HP4263A)를 이용하여 습도에 따른 정전용량의 변화를 측정하였다. 시료의 크기는 2.3mm x 2.3mm의 정방형이다.

그림 3에 나타낸 것과 같이 35% HF용액에서 형성된 다공질 실리콘층으로 만든 시료보다 25% HF용액에서 만든 시료가 높은 정전용량을 보였다. 일반적으로 다공질 실리콘층의 다공율(porosity)은 25% HF용액에서 더 높은 값을 갖는 것으로 알려져 왔다⁽⁷⁾. HF농도가 낮을수록 다공율이 커지는 이유에 대해서는 명확하게 밝혀지지 않았으나 HF용액의 농도가 낮을수록 에탄올의 농도가 증가하면서 표면 침투력이 증가하여 다공율이 증가하는 것으로 추정된다. 그리고 주파수가 높을수록 유전분극의 응답 지연으로 정전용량의 크기는 감소하였고, 낮은 주파수와 고습에서 정전용량의 가파른 상승은 다공질 층내에서 큰 유전상수를 갖는 물에 대한 유전분극이 증대되고 공기의 점유체적이 감소하게 되어 물과 다공질 실리콘사이에서 경계면 분극 효과가 크게 나타나기 때문으로 추정된다.

5. 결론

본 연구에서는 시료의 구조를 기존의 웨이퍼 상하에 전극을 갖는 구조 대신에 집적화 센서로 제작이 가능하도록 상부에 2 전극을 갖는 습도센서로 제작하였다. 이를 위해 산화 다공질 실리콘의 형성과 에칭 및 국부적으로 다공질 실리콘층을 형성하기 위해 반응 선택성과 포토레지스트를 마스크막으로 활용하였다. 그리고 25%와 35%의 HF용액에서 형성된 다공질 실리콘층을 이용한 습도센서를 제작하여 감습특성을 측정하고 비교하였다. 제작된 시료로부터 상온에서 상대 습도와 LCR meter의 표준 주파수의 변화에 따른 정전용량을 측정한 결과, 25% HF용액에서 만든 시료에서 상대적으로 높은 정전용량이 관측되었으며, 낮은 주파수와 고습에서 경계면 분극의 증가에 의해 정전용량의 가파른 상승이 관측되었다.

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. T. Unagami, "Oxidation of porous silicon

and properties of its oxide film", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.19, pp. 231-241 (1980)

4. 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)

5. M. Kruger, et. al., "Formation of porous silicon on patterned substrates", Thin Solid Films, Vol.276, pp.257-260 (1996)

6. P. Steiner and W. Lang, "Micromachining applications of porous silicon", Thin Solid Films, Vol.255, pp.52-58 (1995)

7. Edited by J.C. Vial and J. Derrien, "Porous Silicon Science and Technology", published in Springer-Verlag, (1995)

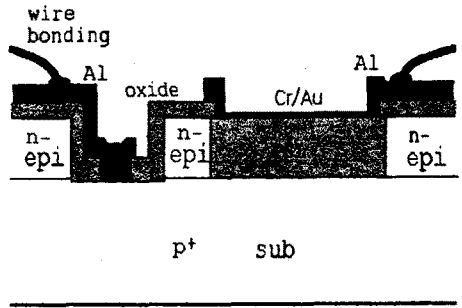


그림2(a) 완성된 시료의 단면도
Fig. 2(a) Cross-section of a completed humidity sensor

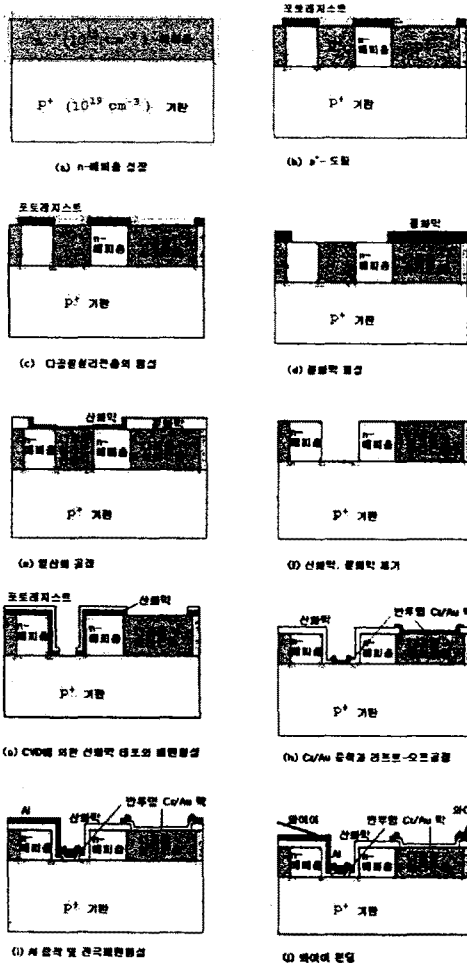


그림1. 정전용량형 습도 센서를 제조하기 위한 공정도
Fig. 1 Process for fabricating capacitance-type humidity sensors

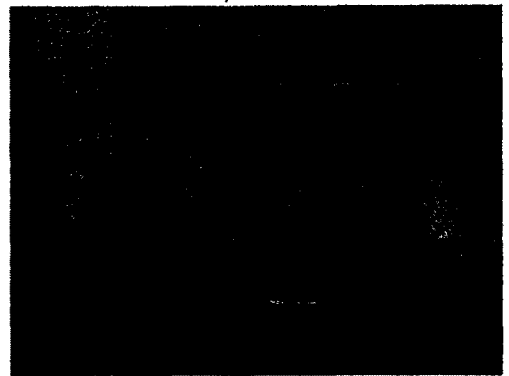


그림 2(b) 완성된 습도센서의 사진
Fig. 2(b) A completed capacitance-type humidity sensor

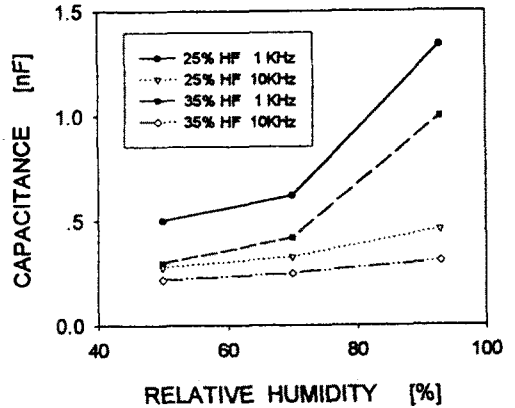


그림3. 제작된 습도센서로부터 측정된 정전용량의 변화
Fig.3 Variation of Capacitance measured from fabricated sensors