

고온용 실리콘 압력센서 개발

김미목*, 남태철*, 이영태**

영남대학교*, 안동대학교**

Development of the high temperature silicon pressure sensor

Mi-Mok Kim*, Nam-Tae Chul*, and Young-Tae Lee**

Yeungnam University*, Andong National University**

Abstract

In this paper, We fabricated a high temperature pressure sensor using SBD(silicon- direct-bonding) wafer of Si/SiO₂/Si-sub structure. This sensor was very sensitive because the piezoresistor is fabricated by single crystal silicon of the first layer of SDB wafer. Also, it was possible to operate the sensor at high temperature over 120°C which is the temperature limitation of general silicon sensor because the piezoresistor was dielectric isolation from silicon substrate using silicon dioxide of the second layer. The sensitivity of this sensor is very high as the measured result of D2200 shows 183.6 $\mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{kPa}$. Also, the output characteristic of linearity was very good. This sensor was available at high temperature as 300°C.

Key Words : Pressure sensor(압력센서), High temperature(고온), Silicon(실리콘), SDB

1. 서론

최근에 자동차를 비롯한 각종 시스템들이 첨단화되면서 고정도의 제어가 필요하게되고, 따라서 고성능 센서의 필요성은 더욱 높아지고 있다. 특히, 고온, 고압, 방사능 분위기와 같은 극한 환경에서 사용이 가능한 센서 개발 요구가 높아지고 있다.

본 논문에서는 SOI(silicon-on-insulator) 구조를 이용하여 고온, 고압 분위기에서 사용이 가능한 고온용 실리콘 압력센서를 개발했다. 실리콘 압력센서는 세라믹스 및 금속 압력센서에 비해서

소형, 고감도이며, 신호처리 회로를 같은 칩(chip) 상에 집적시키는 one-chip화가 가능하다. 또한 실리콘을 사용하기 때문에 반도체 공정 기술을 이용한 대량생산이 용이하다는 장점이 있다. 일반적으로 실리콘 압력센서는 얇은 다이아프램(diaphragm) 위에 확산 압저항(piezoresistor)을 형성하여 제작한다. 확산 저항을 사용할 경우에는, p-n 접합을 통한 누설 전류 때문에 150°C 이상에서는 사용이 불가능하다. 따라서 150°C 이상의 고온에서도 사용이 가능한 압력센서를 제작하기 위해, 절연막으로 반도체 기판과 절연 분리된 압저항 구조를 생각할 수 있다[1]. 본 연구에서는, 실리콘 기판과 절연 분리된 구조의 압저항을

제작하기 위해, 비교적 안정된 전기적 특성을 나타내는 SDB(Si/SiO₂/Si-sub) 웨이퍼를 이용하여 고온용 압력센서를 제작한다. 1 장의 본문 내용이 들어가는 자리입니다.

2. 고온용 압력센서

2.1 압력센서 구조

그림 1에 스테인레스 스틸로 패키징된 압력센서의 구조를 나타냈다. 센서는 스테인레스 스틸 패키지 내에 실리콘 압력센서가 접착되어 있는 구조로 되어있다.

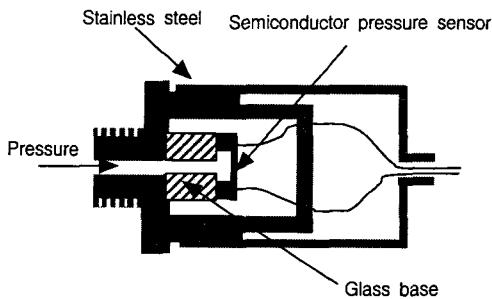


그림 1. Pressure sensor structure.

이 압력센서는 압력이 직접 실리콘 diaphragm에 가해지는 구조로 설계되었다.

일반적인 실리콘 압력센서의 압저항은 집적회로 제작공정을 이용하여 pn접합 저항형으로 제작된다. 그러나 pn 접합형 압저항은 120℃ 근처에서, pn접합을 통한 대량의 누설전류가 발생하기 때문에 고온에서의 사용이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 300℃ 이상의 고온에서 사용할 수 있는 실리콘 압력센서를 제작하기 위해서, 압저항을 절연막으로 완전히 절연 분리시켜서, 누설 전류를 극적으로 감소시킬 수 있는 SOI 구조를 사용했다. 절연 분리된 압저항을 제작하는 방법으로는, CVD(chemical vapor deposition)공정을 이용하여 절연체 위에 다결정 실리콘을 성장시키는 방법, SIMOX(separation by ion implantation) 웨이퍼를 이용하는 방법, SOS(silicon-on-sapphire) 웨이퍼를 이용하는 방법 및 SDB(silicon-direct-bonding) 웨이퍼를 이용하는 방법 등이 있다. 먼

저 다결정 실리콘을 성장하는 방법은, 압저항을 다결정 실리콘으로 제작하기 때문에 센서의 감도가 낮아지는 문제가 있고, SIMOX 웨이퍼는 절연 특성 및 절연분리 공정 상에 문제가 발생할 수 있으며, SOS 웨이퍼는 아직 연구 단계로 본격적인 상품화가 되어있지 않다. 본 연구에서는 상품화가 완료 단계에 있고, 절연 특성이 우수하며, 단결정 압저항을 제작할 수 있는 SDB 웨이퍼를 이용하여 고감도의 고온용 압력센서를 제작했다. 2 장의 본문 내용이 들어가는 자리입니다.

2.2 SDB 웨이퍼를 이용한 고온용 압력센서

그림 2에 압력센서의 구조를 나타냈다. 압력센서의 구조는 정방형 diaphragm 위에 전단 용력형 압저항인 single-element four-terminal piezoresistor를 diaphragm 가장자리에 배치한 구조로 되어있다. 압저항은 단결정 실리콘이며, SiO₂ 절연막으로 실리콘 기판과 절연 분리되어 있다. 압저항은 4개의 단자로 구성되고, 2개의 단자는 전원용, 2개는 출력용 단자로 사용된다.

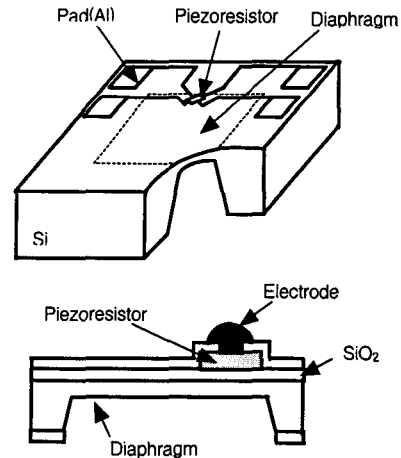


그림 2. Structure of the pressure sensor with SOI structure and the cross-sectional view.

다이아프램의 크기는 2200×2200(μm²)(D2200), 1700×1700(μm²)(D1700), 700×700(μm²)(D700) 인 3종류로, 다이아프램의 두께는 40μm으로 설계했다.

2.3 압력센서 제작공정

압력센서 제작에 사용한 웨이퍼는 일본의

ShinEtsu 제품으로 두께가 Si(1.5 μm)/SiO₂(1 μm)/Si(525 μm)이며, 압저항이 제작될 실리콘 면은 p-type 단결정 실리콘 면으로 저항률이 10-20 Ωcm 이다. 제작공정은 먼저, 웨이퍼 양면을 습식 산화(wet oxidation) 공정으로 1 μm 의 산화막(SiO₂)을 형성하고, 웨이퍼 뒷면에 40 μm 깊이의 V-groove를 형성했다. 다이아프램 형성을 위하여, 웨이퍼 전면을 산화막으로 보호하고, 뒷면에 TMAH 에칭으로 다이아프램을 형성했다. 이때, 다이아프램 형성 시점의 판단은 미리 측정된 에칭 속도에 의한 시간 계산과 v-groove의 관찰로 했다. 에칭 속도는 90 $^{\circ}\text{C}$ 에서 약 0.78 $\mu\text{m}/\text{min}$ 정도였으며, TMAH 용액에 대한 실리콘과 산화막(SiO₂)의 에칭 선택비가 1560:1 이상임을 측정에 의해 알 수 있었다. 양면의 산화막을 전부 제거하고, 웨이퍼 전면에 이온 주입 공정을 이용한 불순물 농도 조절을 시행한다. 본 연구에서는 센서의 감도 및 온도 특성을 고려하여, 불순물 농도를 약 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 정도로 조절했다. 압저항을 형성하기 위하여, 웨이퍼 전면에 포토레지스터를 이용하여 압저항 패터를 형성하고, RIE(reactive ion etching)를 이용하여 건식 에칭(dry etching)을 실시했다. SiO₂ CVD(chemical vapor deposition) 공정으로 전면 절연막을 형성하고, 콘택(contact)을 형성하여, 마지막으로 스퍼터(sputter)를 이용하여 배선 및 전극을 형성했다. 잔류응력에 의한 오프셋을 줄이기 위해서, 실리콘 압력센서와 실리콘과 열팽창계수가 비슷한 Pyrex #7740을 양극접합(anodic bonding)한 후에 패키지에 접착했다. 그림 3에 제작한 압력센서와 패키징된 압력센서의 사진을 나타냈다.

3. 결과 및 고찰

제작된 압력센서의 특성을 분석하기 위하여, 압력과 온도를 동시에 변화시키면서 측정할 수 있는 시스템을 사용했다. 압저항을 구동하기 위하여 압저항의 전원단자에 5V의 직류전압을 인가했다. 압저항의 출력단자에 디지털 멀티미터를 연결하고, 압력을 변화시키면서 출력단자의 전압 변화를 측정하였다. 측정에 사용한 압력 범위는 0~100kPa이다.

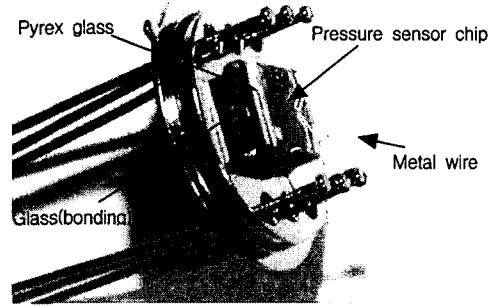


그림 3. Photograph of the pressure sensor.

그림 4에 다이아프램 한 변의 크기가 700 μm (D700), 1700 μm (D1700) 및 2200 μm (D2200)인 압력센서의 측정결과를 나타냈다. 그림 4의 결과에서, D700은 압력감도 약 16.6 $\mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{kPa}$, 비직선성 및 히스테리시스 각각 0.9%FS 및 1.3%FS를 나타냈고, D1700은 압력감도 약 95.6 $\mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{kPa}$, 비직선성 및 히스테리시스는 각각 0.9%FS 및 1.1%FS,

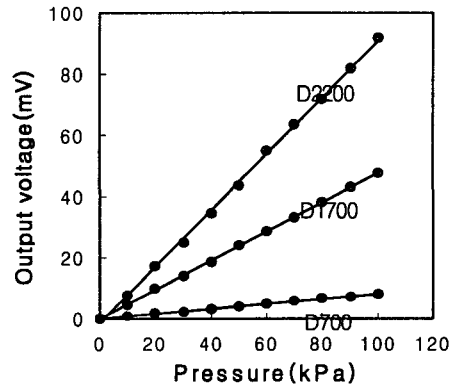


그림 4. Characteristics of the pressure sensor

D2200은 압력감도 183.6 $\mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{kPa}$, 비직선성 및 히스테리시스는 각각 1.3%FS 및 0.9%FS를 나타냈다. 측정된 압력감도는 일반적인 단결정 실리콘 압저항이 나타내는 압력감도에 매우 근접한 값으로, 압저항형 압력센서 제작에 SDB 웨이퍼를 사용함에 있어서 특별한 재료적, 구조적인 문제점은 없는 것으로 간접적인 평가를 할 수 있었다. 제작된 압력센서의 온도 특성을 분석하기 위하여,

측정 시스템의 로(furnace) 내에 압력센서(D2200)를 설치하고, 로 내의 온도를 18℃에서 370℃까지 변화시키면서 압력센서의 감도 온도특성 및 영점 오프셋 온도특성을 측정했다. 측정결과, 18℃에서 184.6 $\mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{kPa}$ 의 감도를 나타내다가, 370℃에서는 감도가 121.4 $\mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{kPa}$ 로 떨어져서, 0.097 %FS/℃의 감도 온도특성을 나타냈다. 영점 오프셋 온도특성은 측정 결과 보상 없이 약 0.026 %FS/℃의 값을 나타냈다. 일반 실리콘 압력센서와 비교할 때, 감도 온도특성 및 영점 오프셋 온도특성이 다소 높게 나타났지만, 실리콘 사용 한계 온도인 400℃ 근처까지의 측정 결과로는 만족할 만한 수준이라 생각된다. 압력센서의 장기 안정도(long term stability)를 측정하기 위하여 30시간 동안의 영점 오프셋 변동을 관찰한 결과, 측정기간 동안 약 $\pm 1^\circ\text{C}$ 정도의 온도 변화가 있었다. 영점 오프셋은 30시간 동안 0.5%FS 이내의 변화 폭을 유지했다. 특히 20시간 이후부터는 0.1%FS 정도의 안정된 변화 폭을 유지했다. 표 1에 D2200의 측정된 사양을 나타냈다.

Table 1. Pressure sensor spec.

항목	규격
제작 압력범위	100 kPa
허용 최대 압력범위	압력 범위의 2배
전원	DC 5 V
출력전압(span)	92 mV (TYP)
압력감도	183.6 $\mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{kPa}$
비직선성	1.3 %FS 이내
히스테리시스	0.9 %FS 이내
측정 온도범위	18~370℃
사용 온도범위	-40~370℃
감도 온도특성	0.097 %FS/℃
영점 오프셋	4.8 mV
영점 오프셋 온도특성 (보상 없이)	0.026%FS/℃

4. 결 론

Si/SiO₂/Si-substrate 구조의 SDB 웨이퍼를 이용하여 고온용 압력센서를 제작했다. 제작한 압력센서의 압력감도를 측정하여, D700은 16.6 $\mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{kPa}$, D1700은 95.6 $\mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{kPa}$, D2200은 183.6 $\mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{kPa}$ 의 고감도의 특성을 나타냄을 알 수 있었다. 또한 센서 출력의 직선성 및 히스테리시스 특성이 우수함을 알 수 있었다. D2200의 감도 온도

특성 및 영점 오프셋 온도특성을 18℃에서 370℃ 사이의 온도범위에서 측정한 결과, 각각 0.097%FS/℃ 및 0.026%FS/℃를 나타냈다.

이상의 결과로부터, 개발된 고온용 압력센서는 적절한 패키징만 개발된다면, 자동차 엔진용 압력센서로 사용될 수 있을 것으로 생각된다. 본 연구에서 개발된 압력센서는 고온뿐 아니라 고 방사능 등의 엄격한 환경용 압력센서로의 사용이 기대된다. 따라서, 자동차 엔진용 이외의 다양한 분야에의 응용이 기대된다.

감사의 글

본 압력센서는 일본의 토요하시기술과학대학의 이시다교수 연구실 및 고체기능디바이스센터 등에서 제작되었다.

참고 문헌

- [1] Y.T.Lee, H.D.Seo, M.Ishida, S. Kawahito and T.Nakamura, "High temperature pressure sensor using double SOI structures with two Al₂O₃ films," Sensors and Actuators, Vol. 43, pp. 59-64, 1994.
- [2] Y.Kanda, "Optimum design consideration for silicon pressure sensors using four terminal gauge," Sensors and Actuators, Vol. 4, pp. 199-206, 1983.