

감도특성 향상을 위한 국부적 표면식각 다이어프램 구조 연구

이곤재[†] · 오동환 · 이종홍 · 김성진*

The Diaphragm Structure Using the Local Surface Etching for the Improvement of Sensitivity Characteristics

Gon-Jae Lee[†], Dong-Hwan Oh, Jong-Hong Lee, and Sung-Jin Kim*

Abstract

In the pressure sensor, about below 20 kPa, the center boss diaphragm structure is generally used, but it is hard to obtain the high sensitivity because the center boss structure is limited at the thickness and size of diaphragm with chip size. Therefore, this paper suggests that the Center boss structure has surface etched diaphragm using a stress concentration to improve the sensitivity. We carried out the simulation and fabrication applied new diaphragm design. In the result, the sensitivity is improved to 60% without the change of non-linearity (0.14%FS). So, the Center boss of surface etched diaphragm can be applied for the high sensitivity in the low-pressure sensor.

Key Words : diaphragm, boss, pressure sensor, stress sensitivity

1. 서 론

압력센서는 압력뿐만 아니라 유량, 유속 및 음향강도 등과 같은 다양한 물리적인 양을 측정할 수 있기 때문에 자동차, 의료, 산업계측 등 산업전반에 널리 사용되고 있다.

MEMS¹기술을 이용한 실리콘 압력센서는 1960년대부터 개발되어 다양한 구조의 압력센서가 제안되고 있다. 1960년대 초에 기계적인 드릴링이나 등방성 식각에 의한 원형 다이어프램 형태가 주로 이용되어 졌다^[1]. 1970년대는 비등방성 식각공정을 이용한 평평한 정방형/직사각형태의 다이어프램이 개발되었고^[2], 현재 압저항형 압력센서에 널리 사용되어지고 있다. 이러한 다이어프램의 형태는 압력센서의 압력검지범위에 따라 달리 적용되는데, 20 kPa 이상의 중고압을 측정하기 위해서는 앞서 언급한 정사각형, 직사각형 혹은 원형의

평평한 다이어프램 구조가 일반적으로 사용되고 있으나, 20 kPa 이하의 저압범위에서는 선형성 및 정확도가 떨어지기 때문에 사용이 불가능한 단점이 있다. 따라서, 저압용 압력센서의 경우 얇은 다이어프램의 휘어짐을 최소화하고 정확한 다이어프램 두께 제어, 저항 배열 그리고, 응력 제어 등을 고려한 특수한 형태 구조의 설계와 공정기술이 요구된다. 저압용 압력센서에서 요구되는 적절한 감도를 위하여 다이어프램을 얇게 할 경우 압력특성의 비선형성이 발생하게 되며, 요구되는 고선형성($\pm 0.5\%FS \downarrow$)을 만족시키기 위하여 다양한 boss² type의 다이어프램 구조의 압력센서가 현재 개발되어 사용되고 있다. 하지만, 이러한 boss구조는 선형성 개선을 위하여 다이어프램의 면적을 감소 시킴으로써 센서의 감도가 낮아져 저압(20 kPa \downarrow)에서의 고감도의 센서를 제작하는데 어려움이 발생되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 boss구조의 다이어프램 형태의 압력센서의 고선형성을 유지하며, 고감도를 구현할 수 있는 구조로 다이어프램의 표면 식각 방법에 의한 압저항 영역에서의 응력집중 효과를 이용한 방법을 제안하였으며, 이를 시뮬레이션 및 실험을 통하여 일반 boss type의 다이어프램을 가진 압력센서와 비교 평가

¹MEMS(Micro Electro Mechanical System): 반도체공정과 마이크로 단위의 초소형 미세가공기술을 이용한 전기 기계적 시스템

㈜ KEC(KEC Corp.)
*금오공과대학교(Kum-Oh National Institute of Technology)

[†]Corresponding author: gilee@kec.co.kr
(Received : December 1, 2003, Accepted : January 7, 2004)

²Boss: 다이어프램의 중앙부위에 달려있는 덩어리

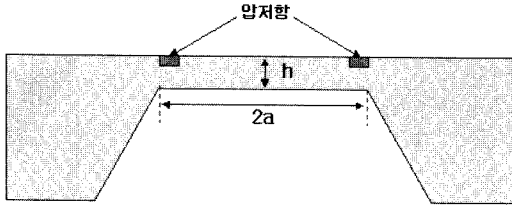


그림 1. 일반 정방형 다이아프램 구조 압저항형 압력센서의 수직 단면도

Fig. 1. Schematic diagram of cross section for the piezoresistive pressure sensor.

하였다.

2. 이 론

2.1. 압력센서의 감도와 선형성

압력센서의 감도는 정격 압력에 대한 출력전압의 비 (mV/kPa)로 응력의 크기와 관련되며, 동일 압력에서 발생하는 응력이 클수록 감도가 증가한다. 그리고, 압력센서의 선형성은 압력측정오차와 관련되는 것으로 diaphragm의 처짐과 관련되어 처짐이 클수록 선형성이 떨어지게 된다.

그림 1과 같은, 압저항이 diaphragm edge에 형성된 일반 다이아프램구조의 압력센서에 대해서 감도(S)와 비선형성에 관한 식은 아래 (1), (2) 식과 같다^[3].

$$S = \frac{V_{OUT}}{P} = 0.51(1-\nu) \frac{a^2}{h^2} \pi_{44} V_S \quad (1)$$

$$\omega_{MAX} = \frac{12(1-\nu^2)}{47} P \frac{a^4}{Eh^4} \quad (2)$$

P = Applied pressure

ν = Poisson ratio

π₄₄ = Piezoresistive coefficient

V_S = Supply voltage

E = Young's modules

위 식에서 알 수 있는 바와 같이 감도는 (alh)²에 비례하고, 센서의 정확도와 관련된 비선형성은 다이아프램의 처짐 정도(ω_{MAX}) 나타내어주는 P(a⁴/h⁴)에 비례함 따라 (alh)가 커지면 감도는 증가하나 처짐도 증가하여 선형성이 떨어지게 된다^[4]. 따라서, 고감도와 최소의 비선형성을 위해서는 alh가 적절히 조절하여야 한다.

2.2. 압력센서의 일반적인 구조

압력센서에서 적용되는 일반적인 구조는 그림 1과

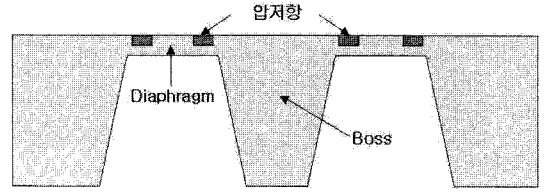


그림 2. Boss 구조 다이아프램의 압력센서 단면도

Fig. 2. The vertical structure of the pressure sensor with boss.

같은 형태의 평평한 정방형 다이아프램 구조이다. 이 구조를 이용하여 중압(20~1000 kPa) 범위에서 출력전압을 100 mV로 설계할 경우, 선형성이 ±0.2%FS 수준으로, 일반적인 요구 사항인 ±0.3%FS~±1.0%FS 수준을 만족하고 있다.

그러나, 일반 정방형 다이아프램 센서를 저압(1~20 kPa 수준)에서 설계할 경우, 선형성이 ±1%FS ↑ 수준으로 일반적인 요구 사항인 ±0.5%FS ↓ 수준을 만족하지 못하게 된다. 이는 저압에서 동일한 감도를 위한 응력 크기를 증가 시켜야 하기 때문에 다이아프램두께를 보다 더 얇게 설계함에 따라 압력에 따른 응력의 비선형성이 증가되었기 때문이다. 이는 인가압력에 의한 큰 휨으로 발생하는 balloon 효과³에 의해 비선형성이 증가하게 되어 발생하는 현상이다. 저압에서 위와 같은 문제점을 보완하기 위하여 그림 2와 같은 boss형 다이아프램이 적용되고 있다. 이 구조는 다이아프램의 중앙부에 boss를 형성하여 boss와 다이아프램의 가장자리 부위에 응력이 집중되어 압저항을 위치시켜 압력을 감지하는 구조로 다이아프램 두께 대비 면적을 감소시켜 선형성을 향상시키는 구조이다.

이러한 boss 구조로 비선형성은 ±0.5%FS ↓ 를 만족하는 수준으로 향상되었지만, 출력전압은 50 mV 수준으로 다이아프램의 면적감소로 인하여 줄어들게 된다. 감도를 높이기 위해서는 두께를 감소시키고, 면적을 증가 시켜야 하지만, 다이아프램 식각공정의 한계와 칩의 크기의 제한적인 요소가 작용하여 감도를 향상시키기에는 어려운 점이 있어, 고감도를 위한 새로운 구조의 제안이 필요하다.

2.3. 고감도를 위한 다이아프램 구조 제안

그림 3에서 보이는 다이아프램 구조는 표면식각을 이용하여 beam 부분과 다이아프램부분의 구조적인 현상으로 응력을 발생시키는 beam 다이아프램 형구

³Balloon 효과: Diaphragm 두께에 비해 변형이 한계값 이상으로 커져, diaphragm 단면에서 응력의 중립면이 없어지게 되어 풍선이 팽창되는 것과 같은 원리

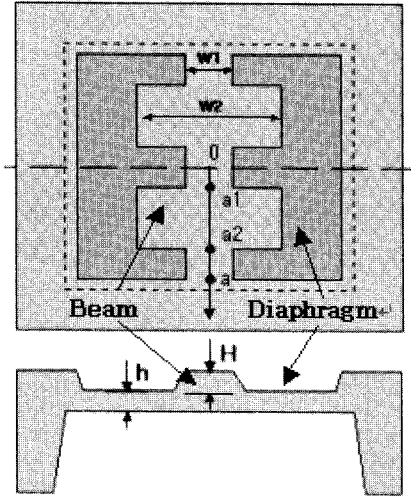


그림 3. Dumb-bell 모양의 beam-diaphragm 구조^[5]
 Fig. 3. Beam-diaphragm structure of dumb-bell shape.

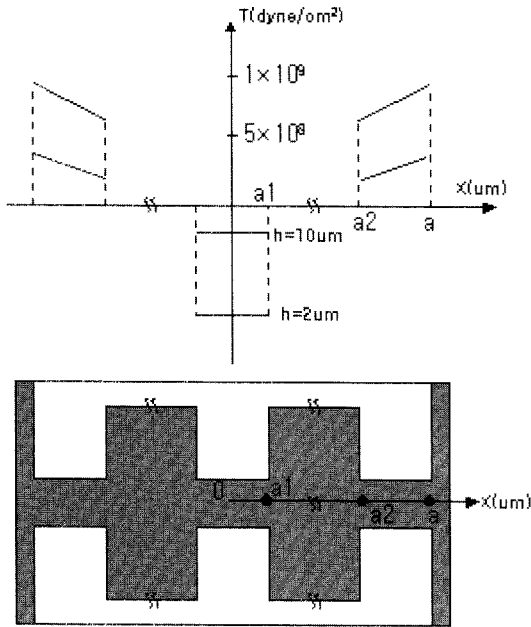


그림 4. Beam 표면에서의 Stress profile^[5]
 Fig. 4. Stress profile of beam surface.

조이다.^[5]

이 구조에서의 응력 분포도 그림 4를 보면, 빔의 좁은영역인 a1, a2, a에 응력이 집중되어 나타나는 것을 알 수 있다. 응력 집중 효과는 두가지 요소가 작용하는 것으로, 먼저, 다이어프램 부분과 빔부분의 두께차이로부터 발생하는 응력집중이 있으며, 두번째로 빔부분에

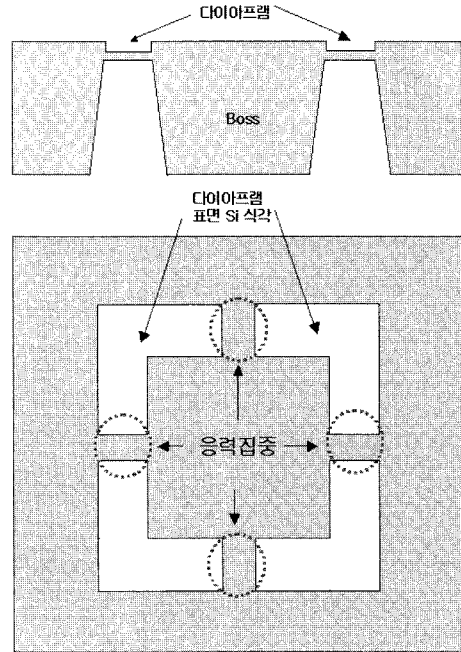


그림 5. 표면식각 다이어프램 구조
 Fig. 5. Schematic diagram for surface etched diaphragm structure.

서 좁은영역의 폭 차이에 의한 응력의 집중이 나타나는 것임을 알 수 있다. 따라서, 이러한 부분에 압저항을 위치할 시 응력의 집중으로 인한 감도의 향상을 꾀할 수 있다는 것을 짐작할 수 있다.

이러한 빔 다이어프램구조는 응력집중효과로 감도향상이 가능하게 된다. 따라서, 그림 5와 같이 기존의 boss 구조하에서 감도특성 향상이 가능하도록 표면 식각에 의한 응력집중현상의 원리를 이용할 수 있는 구조를 제안하였다.

3. 본 론

3.1. 구조 시뮬레이션

Center boss 구조에서의 다이어프램의 표면 식각 시의 응력분포와 응력집중효과를 보기 위하여, 먼저, 일반 Center boss type 다이어프램 구조와 다이어프램 부분의 표면을 식각한 구조에 대하여 응력해석 tool인 ANSYS를 이용하여 응력의 크기 및 분포를 분석하였다. 이때 chip에 대한 공통사항은 그림 6 및 표 1과 같이 boss size는 1500*1500 um의 정사각형 형태이며, 다이어프램의 폭은 260 um, 다이어프램의 두께는 7 um이며, 압력 7 kPa을 인가하여 압저항 영역의 응력을 해석

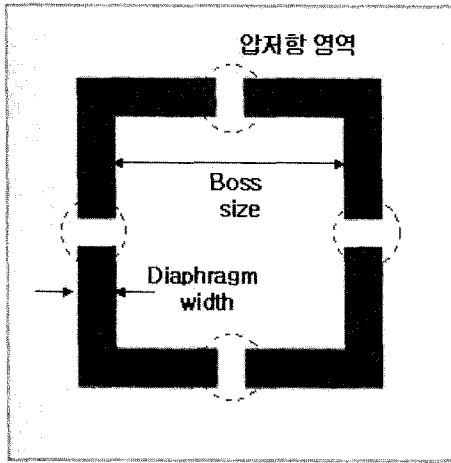


그림 6. Center boss 구조의 다이아프램 표면
Fig 6. Diaphragm surface of the Center boss structure.

표 1. Center boss type 다이아프램 압력센서 각 부위별 size (unit: um)

Table 1. Structure size of pressure sensor with the Center boss diaphragm

| Size | Diaphragm | | Boss |
|------|-----------|-----------|-----------|
| | Width | Thickness | |
| Size | 260 | 7 | 1500*1500 |

하였다.

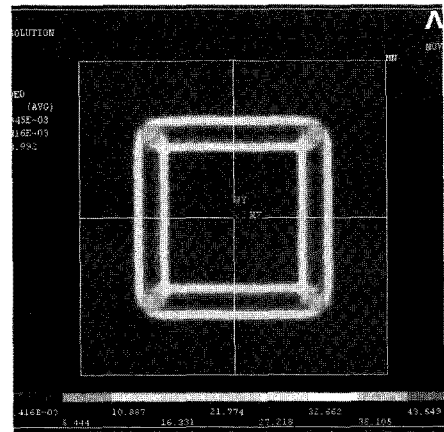
일반 Center boss 다이아프램의 구조에 대한 응력분포와 표면식각 boss 다이아프램에 7 kPa의 압력을 인가했을 때의 응력분포에 대하여 비교분석을 하면, 다이아프램의 전체적인 부분은 일반형은 다이아프램과 boss의 edge 부분에 응력분포가 넓게 퍼져있으며, 표면식각된 다이아프램은 압저항영역에 응력분포가 집중되어있는 것을 확인할 수가 있다(그림 7, 8).

다이아프램의 압저항 영역 중앙부분(점선 A, B) 즉, 다이아프램 edge에서 boss까지의 (0~260 um) 표면에서의 응력을 구하여 비교해 본 결과(그림 9), 전체적으로 표면식각된 다이아프램의 응력이 높게 나타났으며,

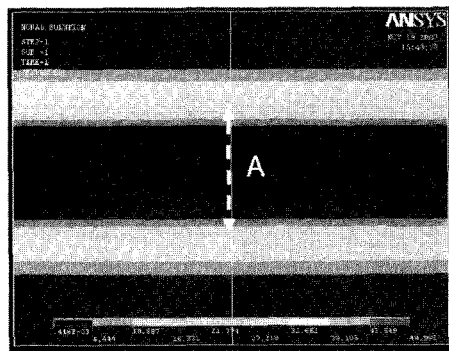
압저항이 배치되는 영역인 edge 부분에서 최고응력이 일반형은 19.6 MPa, 표면식각형은 34.8 MPa로 60% 정도 큰 것을 알 수 있으며, 다이아프램의 표면 식각에 의한 압저항 영역과의 두께차이에 의한 응력집중 효과가 있다는 것을 알 수 있다.

3.3. 시료 제작

압력센서의 응력의 시뮬레이션에 대한 결과를 검증하기 위하여, 일반 Center boss 구조와 표면식각된



(a) 다이아프램 표면



(b) 압저항 위치영역

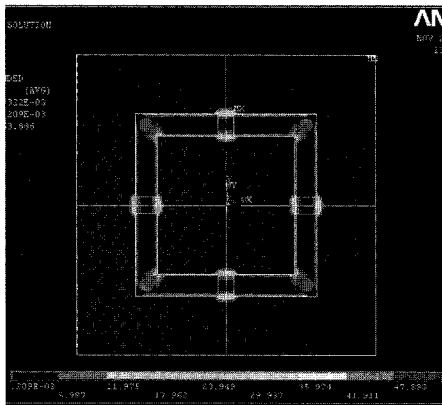
그림 7. 일반 Center boss diaphragm 구조의 응력분포
Fig. 7. Stress distribution of the general Center boss diaphragm structure; (a) the diaphragm surface and (b) the region of piezoresistor.

boss 구조의 압력센서제작을 그림 10과 같은 공정을 이용하여 제작하였다.

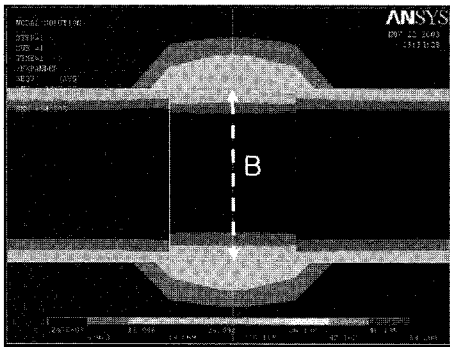
P-type 4인치 wafer를 사용하여 N-Epi를 성장시켰으며, 두께는 일반 Center boss형과 표면식각형 각각 7 um, 10 um로 하였다. 그리고, 압저항/Contact/Metal 공정을 수행한 후 표면 Si 식각을 위해 photo 공정 후 RIE 이용하여 건식식각을 하였다. 식각 gas로는 SF₆, O₂ gas를 사용하여 표면 Si을 3 um를 식각하였다. Backside Si의 식각은 전기화학적 식각방법을 이용하였으며, 일반 Center boss형 압력센서의 공정은 표면 Si 식각공정을 제외한 나머지 공정이 동일하게 수행하였다.

3.4. 시료 제작결과 및 특성평가

일반 Center boss형과 표면식각 boss형 다이아프램을 가진 압력센서를 제작한 결과 그림 11과 같이 표면식



(a) 다이어프램 표면



(b) 압저항 위치영역

그림 8. 표면식각 형 Center boss diaphragm 구조의 응력분포
Fig. 8. Stress distribution of the Center boss diaphragm with the etched surface of diaphragm (a) the diaphragm surface and (b) the region of piezoresistor.

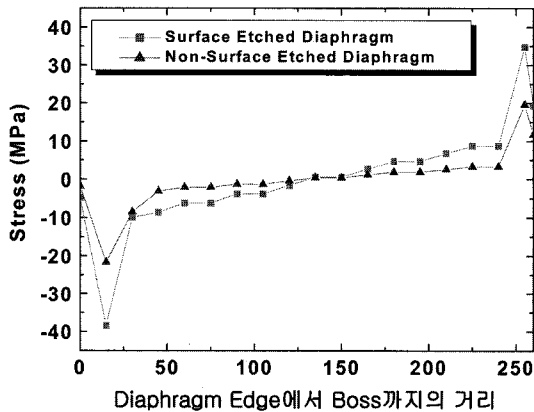
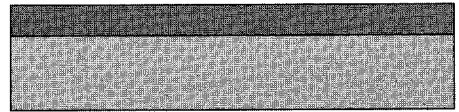
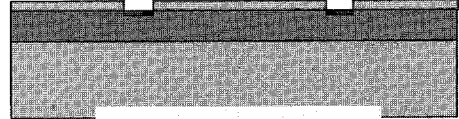


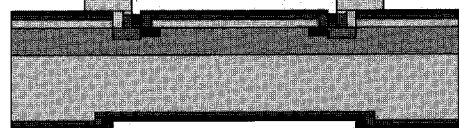
그림 9. 일반 Center boss형과 표면식각 boss형 다이어프램의 응력분포도 비교
Fig. 9. Stress comparison between the general Center boss type and the surface etched type.



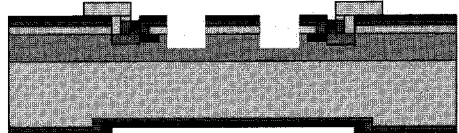
(a) Substrate(Epi./P-Sub)



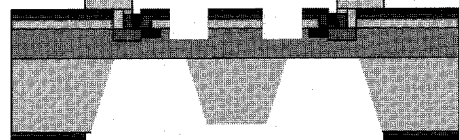
(b) 압저항 형성 공정



(c) Passivation/CNT/Metal 공정



(d) 표면 Si 식각 공정



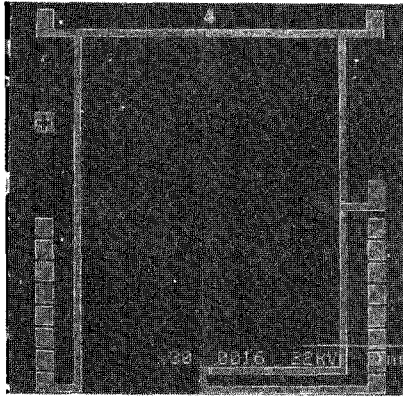
(d) Backside Si 식각 공정

그림 10. Center boss 구조 압력센서 제조공정 수직 단면도(표면식각 다이어프램형)
Fig. 10. Fabrication of the pressure sensor with Center boss.

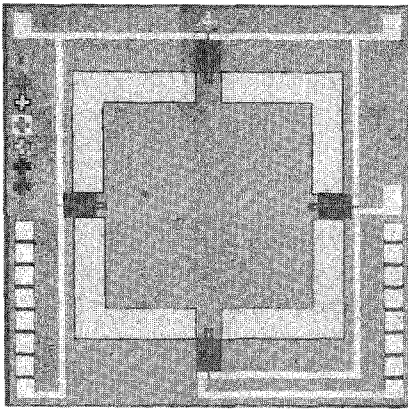
각형 boss 구조의 표면에 표면식각을 하지 않은 일반 Center boss형과 달리 다이어프램 부분에 Si이 식각된 것을 확인 할 수가 있으며, 그림 12에서는 뒷면의 실리콘이 식각되어 boss 구조가 형성된 것을 알 수 있다.

그림 13에서 표면식각형의 수직단면과 표면식각 다이어프램 단면을 보면 표면식각이 식각된 깊이가 3 um 정도로 Si 건식식각이 균일하게 형성되어있는 것을 알 수 있다.

위와 같이 제작된 시료를 각각 게이지 type의 압력 센서 패키지를 하여 상온에서 압력은 7kPa을 인가하여 출력전압, Hysteresis 및 Non-Linearity을 평가하였다. 그림 14(a)를 보면 출력전압은 표면식각형 압력 센서는 81 mV, 표면식각을 하지않은 일반형 Center boss형은 46mV로 표면식각형이 약 60% 정도 감도 특성이 향상된 것을 확인할 수 있었다. 이 결과로 볼 때 응력시뮬레이션 결과와 유사한 결과를 보였으며, 응력 집



(a) 일반 Center boss형



(b) 표면식각 boss형

그림 11. 제작된 압력센서의 다이아프램 표면 SEM 사진
Fig. 11. SEM micrograph of pressure sensor surface; (a) general center boss and (b) center boss with the etched surface type.

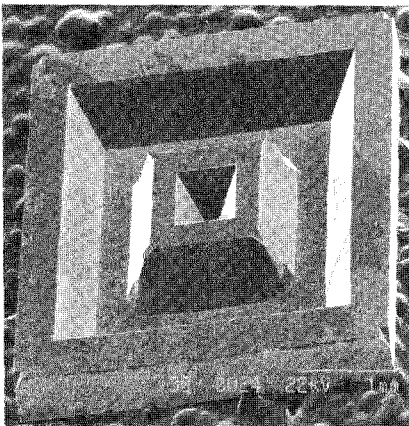


그림 12. 제작된 압력센서의 다이아프램 뒷면 boss의 SEM 사진(표면식각 boss형)
Fig. 12. SEM micrograph of pressure sensor backside.

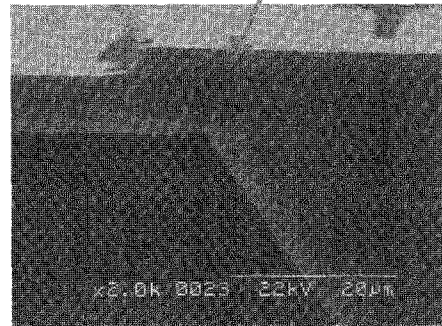
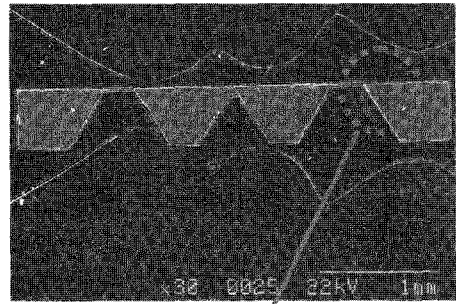
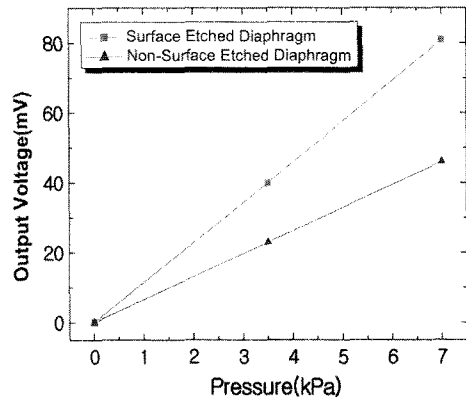


그림 13. 표면식각형의 수직단면 및 표면식각 다이아프램 단면 SEM 사진

Fig. 13. SEM micrograph of the cross section for surface etched type.



(a) 출력전압 그래프

| | Non-Surface etched diaphragm | Surface etched diaphragm |
|--------|------------------------------|--------------------------|
| FSO mV | 46 | 81 |
| Ph %FS | 0.32 | 0.3 |
| Pl %FS | 0.14 | 0.1 |

(b) 센서 특성 표

그림 14. 일반 Center boss형과 표면식각형 다이아프램의 특성 비교

Fig. 14. Characteristics comparison between the general Center boss type and the surface etched type.

중의 효과로 인한 결과임을 알 수 있다. 또한, 그림 14(b)에 나타나 있듯 히스테리시스가 각각 0.32%FS, 0.3%FS으로 거의 동일하였으며, 비선형성 또한 0.14%FS 0.1%FS인 것을 보면, 감도가 향상되어도 선형성은 유지되는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

저압범위를 제어하기 위한 압력센서에 일반적으로 적용되고 있는 Center boss형 다이아프램구조의 감도를 향상시키기 위하여 다이아프램의 표면식각 구조를 제안하였다.

시뮬레이션 결과, 압저항이 배치되는 영역에서 최고 응력이 일반형은 19.6 MPa, 표면식각형은 34.8 MPa로 응력집중 현상을 확인할 수 있었다.

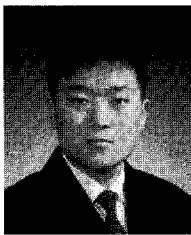
이를 검증하기 위하여 각각의 시료를 제작하여 평가한 결과, 일반 Center boss형과 표면 식각형의 히스테리시스 0.3%FS, 비선형성 0.1%FS 수준으로 동일한 반면 감도특성은 46 mV에서 81 mV로 60% 정도의 특성 향상이 가능함을 알 수 있었다.

이러한 결과로 볼 때 표면식각형 다이아프램 구조는

저압에서 고감도가 요구되는 압력센서의 새로운 구조로 적용 가능함을 알 수 있다.

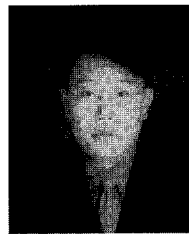
참고 문헌

- [1] M. Nishihara, Y. Yamada, and Y. Matsuo, "Recent semiconductor pressure sensors", *Hitachi Rev.*, June 30, pp. 285.
- [2] J. Binder, K. Becker, and G. Ehrler, "Silicon pressure sensors for the range 2 kPa to 40 MPa. Part 1: A chip for every pressure range", *Siemens Components*, vol. XX(2), pp. 64, 1985.
- [3] Min-Hang Bao, "Micro mechanical transducers", *Hand-book of Sensors and Actuators 8*, pp. 265-279, 2000.
- [4] J. R. Mallon and A. D. Kurtz, "Transducers employing convoluted diaphragms", *U.S. Patent 4467657*, filed March 7, 1983.
- [5] Min-Hang Bao, "Micromachined beam-diaphragm structure improves performances of pressure transducer", *Sensors and Actuators*, A21-A23 pp. 137-141, 1990.



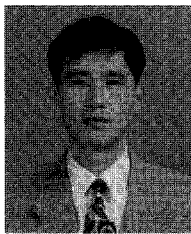
이 곤 재 (Gon-Jae Lee)

- 1998년 2월 배재대학교 무기재료공학과 졸업
- 2000년 2월 한양대학교대학원 세라믹공학과 반도체재료 전공 졸업(공학석사)
- 2000년 ~ 현재 (주) KEC 연구소
- 주관심분야 : MEMS, 실리콘센서, 반도체 공정



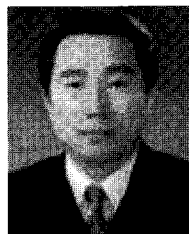
오 동 환 (Dong-Hwan Oh)

- 2001년 2월 금오공과대학교 재료공학과 졸업(공학사)
- 2003년 2월 금오공과대학교 대학원 재료공학과 졸업(공학·석사)
- 2003년 3월 ~ 현재 (주) KEC 연구소
- 주관심분야 : MEMS, 실리콘센서, 반도체 공정



이 종 홍 (Jong-Hong Lee)

- 1990년 2월 충남대학교 재료공학과 졸업(공학사)
- 1996년 8월 경북대 전자공학과반도체전공 졸업(공학석사)
- 2004년 8월 박사과정 졸업예정
- 1989년 ~ 현재 (주)KEC 연구소
- 주관심분야 : 반도체공정, MEMS공정, 실리콘센서



김 성 진 (Sung-Jin Kim)

- 1987년 2월 성균관대학교 금속 공학 전공 (공학박사)
- 1989~현재. 금오공과대학교
- 1998 ~ 1999 - UC Davis, Visiting Scholar
- 주관심분야 : Spark Plasma Sinter를 이용한 신소재 개발, 분말 공학 및 표면 공학