

# 전단 압저항 효과를 이용한 실리콘 압력센서

## (Silicon Pressure Sensor Using Shear Piezoresistance Effect)

權 泰 夏\*, 李 宇 一\*\*

(Tae Ha Kwon and Wu Il Lee)

### 要 約

전단 압저항 효과를 이용하는 실리콘 압력센서를 설계하여 제작하고 이의 특성을 조사하였다. 종래의 브리지형의 센서가 4개의 확산저항을 이용하는데 비해, 이 센서는 1개의 확산저항을 이용하며 압력감도는 다소 떨어지나 온도 보상이 쉬운 장점을 가지고 있다.

크기가  $113 \times 85 \mu\text{m}^2$ 인 p형 확산저항을 다이아프램의 변의 중앙에서 변과  $45^\circ$ 로 위치시켜 만든 센서의 압력감도는 다이아프램의 두께가  $10 \mu\text{m}$ 인 경우  $36 \mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{mmHg}$ 였으며, 0-300mmHg의 압력 범위에서 좋은 직선성을 보였다. 이 센서의 온도계수는  $55 \text{ppm}/^\circ\text{C}$ 였으며, 이것을 온도 보상한 후에는  $6 \text{ppm}/^\circ\text{C}$ 로 낮아졌다. 이 값은  $0.17 \text{mmHg}/^\circ\text{C}$ 에 해당되며, 10-60°C에서 거의 일정하게 유지되었다.

### Abstract

The thin, square-diaphragm silicon pressure sensor utilizing shear piezoresistance effect was designed and fabricated and its characteristics were examined. The sensor has only one diffused resistor, whereas conventional full-bridge sensor has four. Sensitivity is somewhat lower but temperature compensation is easier than the latter.

The proposed sensor was fabricated with only one p-type diffused resistor of the dimension of  $113 \times 85 \mu\text{m}^2$  located near the center of the edge of the diaphragm. The resistor was at  $45^\circ$  with the edge of the diaphragm. The sensitivity of the sensor was  $36 \mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{mmHg}$  and was linear in the pressure range from 0 to 300 mmHg. The temperature coefficient without temperature compensation was  $55 \text{ppm}/^\circ\text{C}$  and it was decreased to about  $0.17 \text{mmHg}/^\circ\text{C}$  with compensation in the range from 10 to  $60^\circ\text{C}$ .

\*正會員, 釜山水産大學 電子通信工學科

(Dept. of Electronics and Communication Eng.,  
Nat'l Fisheries Univ. of Pusan)

\*\*正會員, 慶北大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Kyungpook Nat'l Univ.)

接受日字: 1987年 11月 26日

(※본 연구는 한국과학재단의 지원비로 일부 수행되었음.)

### I. 서 론

컴퓨터와 결합된 측정 및 제어장치들은 정도 및 비용에 있어서 유리하기 때문에 여러 분야에서 이들의 응용에 관한 연구가 진행되고 있다. 여기에는 적절한 센서들이 요구되며, 이들 중 반도체 압력센서는 압력을 쉽게 전기 신호로 변환시킬 수 있을 뿐만 아니라 신뢰성, 안정성 및 재현성 등이 우수하여, 산업기기의 자동화, 심장계통의 압력감시 및 자동차의

전자엔진 제어 등에 널리 응용될 것으로 전망된다.<sup>[2]</sup>

단결정 실리콘은 우수한 탄성특성 뿐만아니라 큰 게이지계수(gauge factor)를 가지고 있어서 반도체 압력센서 재료로 주로 이용되고 있다.<sup>[3]</sup> 실리콘을 재료로 한 압력센서 중에서 확산저항을 이용하는 압력센서<sup>[4~6]</sup>는 확산저항에 큰 응력이 작용하도록 저항 밑의 실리콘 일부를 부식으로 제거하고 다이아프램(diaphragm)을 형성하여 만든다. 다이아프램 위의 저항을 브리지(bridge) 형태로 연결하여 만든 브리지형의 압력센서는 대부분이 종응력(longitudinal stress) 및 종압저항계수(longitudinal piezoresistance coefficient)와 횡응력(transverse stress) 및 횡압저항계수(transverse piezoresistance coefficient)를 이용하고 있다.

브리지형 압력센서는 4 개의 저항을 이용하고 있으며, 이들의 저항값이 일치할때 비교적 큰출력을 얻을 수 있다. 그러나 이 저항들은 불순물 농도의 불균일성에 따른 저항값의 불일치와 압저항계수의 온도 의존성 및 실리콘 자체의 온도 의존성 때문에 온도에 따른 저항변화가 크다. 따라서 압저항계수의 온도변화가 적은 불순물 농도를 택해서 확산저항을 만들고, 균일한 농도의 불순물을 확산시켜 동일한 값의 저항을 만들어 온도 영향을 줄이는 것이 출력을 안정시키는데 중요하다. 그렇지만 온도 보상을 하지않고 사용하는 사용할 수 없으며, 정확한 온도보상을 하기 위해서는 확산저항 개개에 온도 보정을 해야하는 어려움이 있다.<sup>[11]</sup> 따라서 온도 보상과 큰 출력을 얻기 위하여 집적회로화에 대한 연구<sup>[12~16]</sup>가 많이 행해지고 있지만, 이들은 많은 부가의 주변회로가 필요됨으로 우수한 특성을 가지는 기본소자 개발이 무엇보다 중요하다 하겠다.

본 연구에서는 전단응력(shear stress) 과 전단압저항계수(shear piezoresistance coefficient)도 이용할 수 있을 만큼 크다는 점에 착안하여, 이들을 이용하는 센서를 설계하여 제작하고 특성을 조사하였다. 이를 위해 먼저 실리콘 다이아프램 위의 응력분포를 계산하고, 응력분포가 큰 위치에 p형의 확산저항을 형성하여 그림 1 과 같은 실리콘 압력센서를 만들었다. 이 센서의 감도를 측정하여 이론치와 비교하고, 확산저항의 위치에 따른 감도도 조사하였다. 또 브리지형의 센서의 특성과도 비교하였으며, 이것은 온도 보상이 비교적 쉽다는 것도 보였다.

II. 이론과 설계

1. 압저항 효과

압저항 효과는 Herring<sup>[17]</sup>이 many-valley conduc-

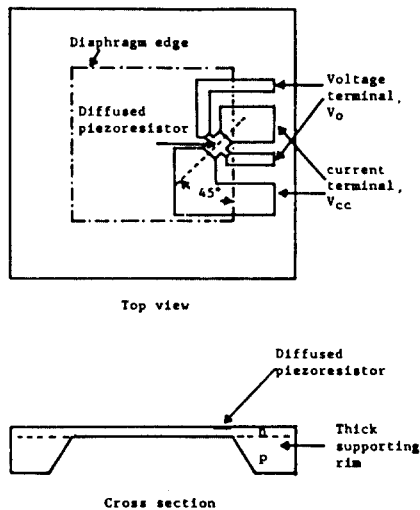


그림 1. 전단 압저항 효과를 이용한 압력센서의 구조  
Fig 1. Transducer structure using shear piezoresistance effect.

tion/valence-band model 로 설명 하였으며, 실리콘과 게르마늄의 압저항 효과에 대한 기초적인 연구결과가 1954년 Smith<sup>[18]</sup>에 의해 처음으로 보고된 이래 이에 관한 연구결과가 다수 발표 되었다.<sup>[19~24]</sup>

실리콘과 같은 입방결정에서 압저항계수는 단지 3 개의 독립된 값  $\pi_{11}$ ,  $\pi_{12}$  및  $\pi_{44}$  만 가진다.<sup>[4]</sup> 여기서  $\pi_{ij}$ 는 전장 및 전류의 방향이 i이고, 응력의 방향이 j일때의 압저항계수이다. 물체에 응력이 작용할때 저항변화율<sup>[7]</sup>은

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_{11} \sigma_1 + \pi_{44} \sigma_2 \tag{1}$$

이다. 여기서  $\pi_{11}$ 은 종압저항계수,  $\sigma_1$ 은 종응력,  $\pi_{44}$ 는 횡압저항계수,  $\sigma_2$ 는 횡응력을 나타낸다. 브리지형 센서는 이 응력에 따른 저항변화를 이용한다.

실리콘과 같이 대칭성을 가지는 재료에 대해서 각 결정축의 전장이  $E_1, E_2, E_3$  이고, 전류밀도가  $J_1, J_2, J_3$  이며 응력이  $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{23}$  일때

$$\frac{E_1}{\rho} = J_1 [1 + \pi_{11} \sigma_{11} + \pi_{12} (\sigma_{22} + \sigma_{33})] + \pi_{44} (J_2 \tau_{12} + J_3 \tau_{13}) \tag{2}$$

$$\frac{E_2}{\rho} = J_2 [1 + \pi_{11} \sigma_{22} + \pi_{12} (\sigma_{11} + \sigma_{33})] + \pi_{44} (J_1 \tau_{12} + J_3 \tau_{23}) \tag{3}$$

$$\frac{E_3}{\rho} = J_3 [1 + \pi_{11} \sigma_{33} + \pi_{12} (\sigma_{11} + \sigma_{22})] + \pi_{44} (J_1 \tau_{13} + J_2 \tau_{23}) \tag{4}$$

로 표현된다.<sup>[25]</sup> 여기서 1,2,3은 결정의 축방향을 나타내며,  $\rho$ 는 응력이 없을 때의 저항율을 나타내고,  $\sigma_{ii}$ 는  $i$ 방향으로의 응력을,  $\tau_{ij}$ 는  $i, j$ 방향으로의 전단 응력을 나타낸다. 식 (3)에서  $J_2 = J_3 = 0$ 으로 가정하면

$$E_2 = J_1 \rho \pi_{44} \tau_{12} \quad (5)$$

가 된다. 이것은 전류밀도  $J_1$ 에 의해 이와 직각방향으로  $E_2$ 가 발생하며, 이것은  $\tau_{12}$ 에 비례한다. 전단 압저항형 센서는 식 (5)를 이용한다.

## 2. 다이아프램상의 응력분포

그림 1과 같은 실리콘 압력센서는 부분적으로 얇은 다이아프램을 이용하며, 이 다이아프램은 둘레에 두껍고 단단한 체적으로 고정지지 되어 있다. 이 정사각형의 다이아프램에 균일한 압력이 가해질 때의 휨을  $W$ 라 하면

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \quad (6)$$

이다.<sup>[26]</sup> 여기서  $W_1$ 은 가장자리가 단순지지된 경우의 휨을,  $W_2$ 는  $x$ 방향으로 양변이 고정지지된 경우의 휨을,  $W_3$ 은  $y$ 방향으로 양변이 고정지지된 경우의 휨을 나타낸다.  $x$  및  $y$ 방향으로의 응력을  $\sigma_x$  및  $\sigma_y$ , 전단응력을  $\tau_{xy}$ 라하면

$$\sigma_x = -\frac{h}{2(1-\nu^2)} \left[ E_x \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + E_y \nu \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right] \quad (7)$$

$$\sigma_y = -\frac{h}{2(1-\nu^2)} \left[ E_y \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + E_x \nu \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right] \quad (8)$$

$$\tau_{xy} = h G_{xy} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \quad (9)$$

이다. 여기서  $h$ 는 다이아프램의 두께,  $\nu$ 는 poisson 비,  $E_x$  및  $E_y$ 는  $x$  및  $y$ 방향으로의 Young 율,  $G_{xy}$ 는 전단계수를 나타낸다.

$x$ 또는  $y$ 축과  $\theta$ 각을 이루는 경사면상의 전단응력  $\tau$ 는

$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (10)$$

이다. 식 (10)에서  $\tau$ 는  $\theta = 45^\circ$ 일때 최대가 된다.  $\sigma_x$  및  $\tau$ 를 규준화한 값  $\bar{\sigma}_x$ ,  $\bar{\tau}$ 로 나타내면

$$\bar{\sigma}_x = \frac{\sigma_x h^2}{p a^2} \quad (11)$$

$$\bar{\tau} = \frac{\tau h^2}{p a^2} \quad (12)$$

이다. 여기서  $p$ 는 압력,  $a$ 는 다이아프램의 한변의 길

이다.  $\bar{y} = 0$ 와  $\bar{y} = a/4$ 에서의  $\bar{\sigma}_x$ 와  $\bar{\tau}$ 를 그림 2에 나타내었다.  $\bar{\sigma}_x$ 와  $\bar{\tau}$ 는  $\bar{y} = 0$ 일때 가장자리에서 최대가 된다. 따라서 큰 출력을 얻기 위해서는 확산저항을 각 변의 중앙의 가장자리에 위치 시키는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

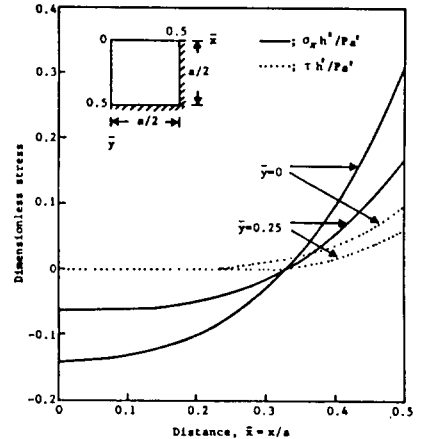


그림 2. 네변이 고정지지된 실리콘 다이아프램의 응력분포

Fig 2. Dimensionless stress distribution on a silicon diaphragm having built-in edges.

## 3. 확산저항의 불순물 농도

확산저항으로는 압저항계수  $\pi_{44}$ 가 큰 p형 저항이 주로 이용되며, 압저항계수  $\pi_{44}$ 는 (100)면의 실리콘에서는 (110)방향으로 가장 크게 나타난다.<sup>[24]</sup>

확산저항의 압저항계수가 표면 불순물농도에 의존하며 확산층의 두께와는 거의 무관하다는 것은 Tufte 등<sup>[20]</sup>에 의해 보고 되었다. 이에 의하면 압저항계수  $\pi_{44}$ 는 표면 불순물 농도가 낮을수록 커진다. 그러나 확산저항의 온도계수도 표면 불순물 농도에 따라 변화한다. 따라서 온도에 의한 영향을 줄이기 위해서는 온도계수와 계이지계수의 비가 최소가 되는 불순물 농도를 선정하는 것이 좋다. 이 값은 대략  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  정도이다.

## 4. 브리지형의 센서

브리지형의 압력센서에서는 종응력과 횡응력을 이용한다. 이 응력은 그림 2에서 알 수 있듯이 다이아프램의 변의 중앙에서 그 변에 가까울수록 커진다. 또 (100)면의 실리콘에서는 (110)방향의 압저항계수가 가장 크다. 따라서 확산저항의 위치는 다이아프

램의 변의 중앙에서 그 변에 가깝게 위치시키고 저항의 길이 방향은 <110> 방향과 일치시키는 것이 압력에 대한 감도를 높이는 데 대단히 중요하다.

저항변화가 크게 나타나는 4 곳에 4 개의 저항을 위치시키며, 4 개의 저항 중에서 다이아프램의 변에 평행한 2 개의 저항은 동일한 크기로  $20 \times 120 \mu\text{m}^2$  이며, 맞보는 양변에, 각 변에서 약  $40 \mu\text{m}$  의 간격을 두고 위치하였으며, 변에 수직인 2 개의 저항도 맞보는 양변에, 각 변에서  $20 \mu\text{m}$  의 간격을 두고 위치하였다. 이 저항은 크기가  $20 \times 60 \mu\text{m}^2$  인 2 개의 저항이 서로  $20 \mu\text{m}$  떨어져서 길이방향으로 평행하게 놓였다. 실제 센서의 크기는  $3.0 \times 3.0 \times 0.17 \text{mm}^3$  이며 다이아프램의 면적은  $1 \times 1 \text{mm}^2$  이다.

5. 전단 압저항형 센서

그림 2 에서 알 수 있듯이 전단응력도 다이아프램의 변의 중앙에서 그 변에 가까운 곳일수록 응력분포가 크다. 따라서 큰 압력감도를 얻기 위해서는 응력이 큰 위치에 확산저항을 형성하여야 한다.

실제된 확산저항의 길이는  $113 \mu\text{m}$  이며, 폭은  $85 \mu\text{m}$  정도이다. 이것을 다이아프램의 변의 중앙에서 그 변과  $45^\circ$  측 <100> 방향으로 위치시키고, 중심을 그 변에서  $80 \mu\text{m}$  의 간격을 두고 위치시켰다. 역시 센서의 크기는  $3.0 \times 3.0 \times 0.17 \text{mm}^3$  이며, 다이아프램의 넓이는  $1 \times 1 \text{mm}^2$  이다.

확산저항의 위치변화에 대한 특성을 조사하기 위하여 확산저항의 중심이 다이아프램의 변의 중앙에서  $120 \mu\text{m}$  및  $160 \mu\text{m}$  떨어져서 위치한 소자도 설계하였다.

III. 실험

1. 실리콘 다이아프램의 제작

확산저항을 이용하는 센서의 감도는 압력에 따른 응력이 변화율에 비례한다. 변화율을 크게 하기 위해서는 큰 변형이 필요하며 변형은 판의 두께의 재굴에 반비례한다. 따라서 두께가 얇고 넓은 판을 이용하는 것이 바람직하다. 이를 위해서 실리콘을 부식하여 다이아프램을 만든다.

본 실험에서는 p-n 접합을 이용한 전기부식법<sup>27)</sup>을 사용하여 실리콘 다이아프램을 만들었다. 이때 사용한 부식액은  $\text{NH}_2(\text{CH}_2)_2\text{NH}_2 : \text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2 : \text{H}_2\text{O}$  를  $75\text{ml} : 12\text{g} : 24\text{ml}$  로 혼합한 이방성 부식액이며, 부식액의 온도는  $110 \pm 0.5^\circ\text{C}$  로 유지하였다. 부식액의 산화방지를 위해서 부식조내의 공간을  $\text{N}_2$  로 채웠다.

n형 실리콘 표면에  $\text{C}_r$ 과  $\text{A}_u$ 를 차례로  $500 \text{ \AA}$  및  $1 \mu\text{m}$  정도의 두께로 진공 증착하여 (+) 전극으로 하

고 (-) 전극으로는  $3 \times 3 \text{cm}^2$ 의 백금판을 써서 이들 사이에 약  $0.4\text{V}$ 의 전압을 가하여 p형 실리콘을 부식하였다.

2. 소자의 제조

본 실험에서 사용한 실리콘 웨이퍼는 저항율이  $18 - 22 \Omega \cdot \text{cm}$ , 직경이 3 인치, 두께가  $160 \mu\text{m}$  이고 결정면이 (100)인 p형 기판에 저항율이  $15 - 28 \Omega \cdot \text{cm}$ , 두께가  $10 \mu\text{m}$  및  $20 \mu\text{m}$  가 되도록 n층을 에피택셜 성장시킨 2 종류이다.

그림 3 은 소자의 제조과정을 단계적으로 나타낸 것이다. 먼저 실리콘 웨이퍼를  $2 \times 2.3 \text{cm}^2$ 의 크기가 되도록 <110> 방향으로 잘랐다. 이것을 표준세척공정에 따라 세척한 다음  $1100^\circ\text{C}$ 에서 습식산화법으로  $\text{SiO}_2$ 를  $4000 \text{ \AA}$  정도 성장시켰다.

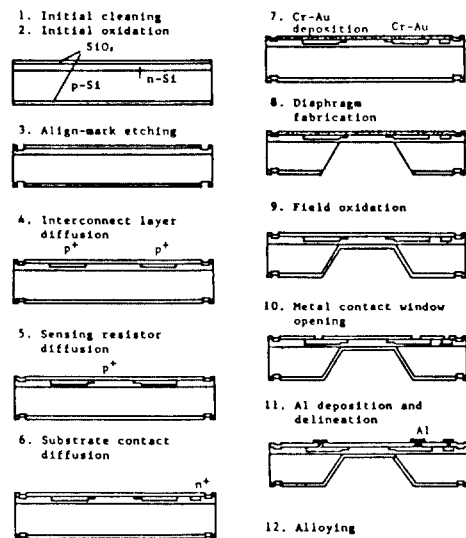


그림 3. 압력센서의 제조과정  
Fig. 3. Process sequence for the fabrication of pressure sensor.

p형 확산저항은 실리콘 웨이퍼의 앞면 즉 n형 실리콘인 다이아프램상의 가장자리 근처에 위치시킨다. 또 다이아프램을 만들기 위해서는 그림 1 에서와 같이 뒷면의 p형 실리콘을 부식시켜야 하므로 실리콘 웨이퍼의 앞과 뒷면에 이들을 위한 마스크 정렬용 포지를 만들어야 한다. 이 포지를 만들기 위해서 Heinz 등<sup>28)</sup>이 개발한 double-sided photolithography가 있으나, 이 방법은 추가장치를 필요로 한다. 본 실험에서 사용한 방법은 동일한 마스크 두장을 이용하는 것으로,

앞뒤면에 감광물질이 도포된 웨이퍼를 한장의 마스크에 붙이고 이 위에 다른 마스크를 놓고 포지를 일치시킨 후 차례로 양쪽을 로광시켜서 포지를 만드는 것이다. 이렇게 한 결과 약 15 $\mu\text{m}$ 의 오차가 있었다.

소자내에서 각 요소의 연결선을 만들기 위하여 붕소확산용 창을 열고 1050 $^{\circ}\text{C}$ 에서 60분간 붕소를 pre-deposition하였다. 이때 사용한 불순물원은 BN 웨이퍼(BN-1250)이다. 붕소의 pre-deposition 후에 생긴 BSG를 700 $^{\circ}\text{C}$ 에서 15분간 습식산화법으로 저온산화한 후 buffered HF 용액으로 제거했다. 붕소의 outdiffusion을 줄이기 위해서 1100 $^{\circ}\text{C}$ 의 산소분위기에서 10분간 drive-in 한 후, 같은 온도의 수증기/산소분위기에서 30분간 drive-in 하였다.

소자의 확산저항을 위한 창을 열고 950 $^{\circ}\text{C}$ 에서 35분간 BN 웨이퍼(BN-1100)를 써서 붕소를 pre-deposition 한 후 위와 같은 방법으로 BSG를 제거했다. 붕소의 outdiffusion을 줄이기 위해서 역시 1100 $^{\circ}\text{C}$ 의 산소분위기에서 10분간, 같은 온도의 수증기/산소분위기에서 90분간 drive-in 하였다. 소자제조 후 이 확산저항의 면저항은 200 $\Omega/\square$  정도였으며 접합의 깊이는 2.5 $\mu\text{m}$  정도였고, 불순물 농도는 약 10 $^{19}\text{cm}^{-3}$ 였다.

금속과 접촉시 음성접촉을 만들기 위하여 n형 기판에 확산창을 열고 950 $^{\circ}\text{C}$ 에서 15분간 POC1<sub>3</sub>로 인을 pre-deposition 한 후 PSG(phosphosilicate glass)를 buffered HF 용액으로 제거했다. 이것은 소자의 동작시 기판에 역방향 바이어스로 누설전류를 줄이기 위한 것이다.

전기부식법으로 실리콘을 부식시킬 때 전극으로 사용할 C<sub>r</sub>과 A<sub>u</sub>를 각각 500 $\text{\AA}$  및 1 $\mu\text{m}$ 의 두께로 n형 표면에 진공증착하였다. 그런 다음 확산저항이 있는 뒷면의 p형 실리콘을 부식시켜서 다이아프램을 만들었다. 이어서 C<sub>r</sub>과 A<sub>u</sub>를 각각의 부식액으로 제거한 후 부식 마스크로 사용한 SiO<sub>2</sub>를 제거하고 세척한 다음 1100 $^{\circ}\text{C}$ 의 수증기/산소분위기에서 30분간 n형 불순물을 drive-in 하였다. 이때 성장된 SiO<sub>2</sub>를 field 산화막으로 이용하였다.

전극은 전극접촉창을 열고 Al을 2 $\mu\text{m}$  정도의 두께로 진공증착하여 형성한 후 450 $^{\circ}\text{C}$ 에서 25분간 열처리하였다.

3. 온도 보상

확산저항은 온도 변화에 따라 저항치가 변화하므로 적절한 방법으로 이것을 보상시켜야 한다. 브리지형의 센서에서는 4개의 확산저항을 이용하기 때문에 온도보상용 저항이 적어도 2개이상 필요하다. 이들의 저항값은 센서의 온도특성에 따라 결정된다.

확실한 온도보상을 위해서는 확산저항 각각을 온도보정해야 하는 어려움이 있다.

반면 전단 압저항형 센서에서는 한개의 확산저항을 이용하기 때문에 한개의 온도보상용 저항으로 온도보상을 할 수 있어서 온도보상이 쉽고 간단하다. 온도보상을 위해서 압력측정용 확산저항과 동일한 한개의 확산저항을 다이아프램 밖에 형성하였다. 이것을 이용하여 그림 4와 같은 온도보상회로를 구성하였다. 여기서 R<sub>ps</sub> 및 R<sub>ts</sub>는 압력 감지용 및 온도보상용 확산저항이며 R<sub>s</sub> 및 R<sub>t</sub>는 offset 조정용이다.

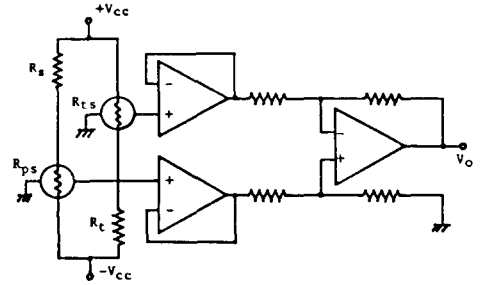


그림 4. 온도보상 회로  
Fig. 4. Temperature compensation circuit.

4. 측 정

제조한 소자를 지지판에 수직으로 붙여서 다이아프램의 뒷부분에는 일정한 압력을 유지시키고 압력감지부가 있는 앞부분에 공기압을 가해서 특성을 측정하였다. 그림 5는 측정장치를 나타낸 것이다.

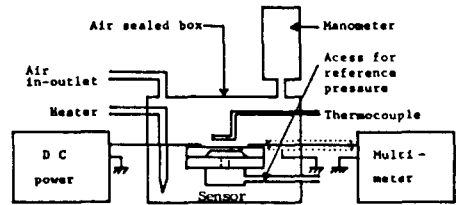


그림 5. 압력 측정장치  
Fig. 5. Pressure measurement set-up.

소자의 압력감도 S는

$$S = \frac{1}{V_{cc}} \frac{\partial V_o}{\partial P} \tag{13}$$

로 정의할 수 있다. 여기서 V<sub>cc</sub>는 공급전압이며 V<sub>o</sub>는 출력전압, P는 압력을 나타낸다.

IV. 결과 및 고찰

1. 브리지형의 센서

그림 6 은 브리지형 센서의 압력에 따른 출력전압을 나타낸 것이다. 이때 공급전압은 5V였다. 다이아프램의 두께가 10 $\mu\text{m}$  인 센서의 감도는 42 $\mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{mmHg}$  정도였으며, 20 $\mu\text{m}$  인 것의 감도는 16 $\mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{mmHg}$  정도였다. 두께가 10 $\mu\text{m}$  인 센서의 이론적인 감도는 50  $\mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{mmHg}$  정도이다. 실제 소자의 감도와 이론적인 감도의 차이는 실제 소자내의 확산저항의 위치가 이론에서 가정된 위치와 불일치했기 때문이며, 이것은 앞뒤 마스크 정렬용 표지의 오차에서 비롯된 것으로 생각 된다.

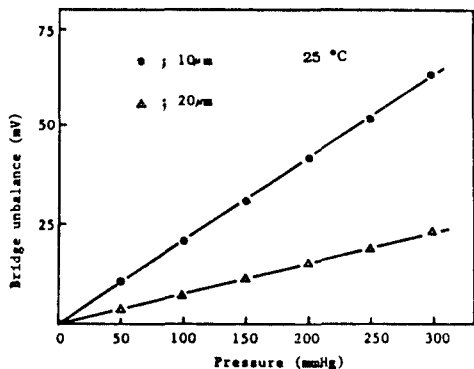


그림 6. 다이아프램의 두께가 다른 브리지형 센서의 압력감도

Fig. 6. Pressure sensitivity of the full-bridge sensors with different diaphragm thickness.

2. 전단 압저항형의 센서

그림 7 은 다이아프램의 두께가 10 $\mu\text{m}$  및 20 $\mu\text{m}$  인 전단 압저항형 센서의 압력에 따른 출력전압을 나타낸 것이다. 두께가 10 $\mu\text{m}$  인 센서의 감도는 36 $\mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{mmHg}$ 였으며, 20 $\mu\text{m}$  인 센서의 그것은 14 $\mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{mmHg}$  정도였다. 역시 공급전압은 5V로 하였다. 다이아프램의 두께가 10 $\mu\text{m}$  인 센서의 이론적인 감도는 45  $\mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{mmHg}$  정도이다. 여기서도 실험치와 이론치의 차가 있었으며, 이것 역시 브리지형 센서에서 언급된 원인과 같다고 생각된다.

그림 8 은 다이아프램의 두께가 10 $\mu\text{m}$  일때 전단 압저항효과를 이용하는 센서의 확산저항의 위치를 변화시킨 결과를 나타낸 것이다. 변의 중앙에서 다이아프램의 중심으로 확산저항의 중심이 80 $\mu\text{m}$  떨어졌을 때의 감도는 36  $\mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{mmHg}$  정도였고, 120 $\mu\text{m}$  떨어졌을 때는 24  $\mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{mmHg}$  정도였으며 160 $\mu\text{m}$  떨어졌을 때는 17  $\mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{mmHg}$  정도였다. 따라서 변에 가까워진 쪽이 큰 감도를 나타내며, 이것은 응력 분포의 경향과 일치하였다.

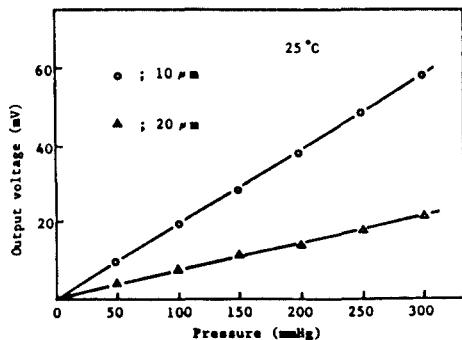


그림 7. 다이아프램의 두께가 다른 전단 압저항형 센서의 압력감도

Fig. 7. Pressure sensitivity of shear piezoresistive sensors with different diaphragm thickness.

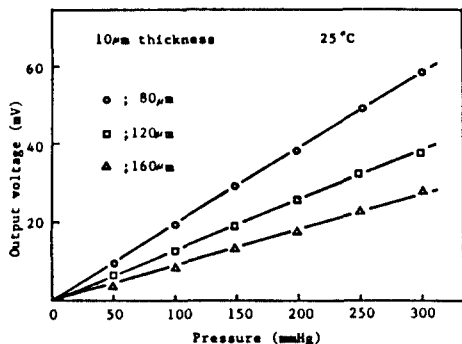


그림 8. 확산저항의 위치에 따른 전단 압저항형 센서의 압력감도

Fig. 8. Pressure sensitivity of shear piezoresistive sensors on the different positions.

3. 온도특성

그림 9 는 확산저항의 온도변화에 따른 저항치의 변화를 나타낸 것이다. 0 $^{\circ}\text{C}$ 의 저항치로 표준화했을 때 80 $^{\circ}\text{C}$ 에서 약 12%의 저항치의 증가를 나타냈다.

그림 10 은 압력을 0 에서 100 mmHg로 변화시킨 경우 확산저항의 온도변화에 따른 저항변화율을 나타낸 것이다. 저항변화율은 온도가 상승함에 따라 미소하게 감소하였다.

다이아프램의 두께가 10 $\mu\text{m}$  인 센서의 온도계수는

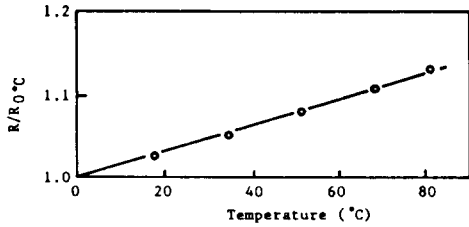


그림 9. 0°C의 저항값으로 표준화한 확산저항의 온도변화

Fig. 9. Variation of the resistance with temperature for diffused resistor. The resistance values are normalized to the 0°C value.

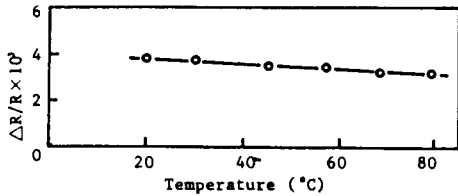


그림 10. 압력을 0에서 100mmHg로 변화시킨 경우의 확산저항의 온도변화에 대한 저항변화율

Fig. 10. Variation of  $\Delta R/R$  with temperature for diffused resistor when the pressure was changed from 0 to 300 mmHg.

55ppm/°C 정도였으며, 이것은 1.7mmHg/°C에 해당된다. 이것을 전단압저항형 센서에서 온도보상한 후에는 6mmHg/°C 정도로 낮아졌다. 이 값은 0.17mmHg/°C에 대응되는 것이며 10°C에서 60°C의 온도범위에서 거의 일정하게 유지되었다.

V. 결 론

본 연구에서는 전단압저항효과를 이용한 압력센서를 만들고 이의 특성을 조사하였다. 이 센서는 채래의 브리지형의 센서가 4개의 확산저항을 갖는데 비해 단 하나의 확산저항을 가지며, 감도는 다소 떨어지나 온도보상이 쉽다는 장점을 가지고 있다.

실리콘 다이아프램을 만들기 위해서는 p-n접합 부식정지법을 이용했다. 이때 실리콘 웨이퍼와 백금전극 사이에 약 0.4V의 전압을 가하였다. 제작된 다이아프램의 넓이는 1 × 1mm<sup>2</sup>이며 두께는 10μm와 20μm의 두 종류였다.

다이아프램 상에서 응력분포는 변의 중앙에서 가장자리에 가까울수록 크게 나타났다. 응력분포가 크

게 나타나는 위치에 면저항이 200Ω/□이며 크기가 20 × 120μm<sup>2</sup>인 p형 확산저항을 형성하여 브리지형의 압력 센서를 만들었다. 이 센서의 감도는 다이아프램의 두께가 10μm 및 20μm인 경우 각각 42μV/V · mmHg 및 16μV/V · mmHg 정도였다.

한편 같은 넓이의 다이아프램상에 면저항이 같고 크기가 113 × 85μm<sup>2</sup>인 p형 확산저항으로 전단 압저항형의 압력센서를 만들었다. 이 확산저항은 전단응력이 코도록 변과 45°의 각을 이루었으며, 이것 역시 응력분포가 가장 큰 곳인 변의 중앙에 가깝게 위치하도록 하였다. 다이아프램의 두께가 10μm 및 20μm인 경우 각각 36μV/V · mmHg 및 14μV/V · mmHg의 압력감도를 나타냈다. 다이아프램의 두께가 10μm인 센서의 온도계수는 55ppm/°C 정도였으며, 이것을 온도보상한 후에는 6ppm/°C 정도로 낮아졌다. 이 값은 0.17mmHg/°C에 대응되는 것이며, 10°C에서 60°C까지의 온도 범위에서 거의 일정하게 유지되었다.

센서의 압력감도는 확산저항의 위치가 다이아프램의 변의 중앙에서 변에 가까울수록, 다이아프램의 두께가 얇을수록 크게 나타났으며, 압력에 대한 출력의 변화는 0 - 300mmHg의 압력범위에서 모두 좋은 직선성을 보였다.

參 考 文 獻

- [1] W.G. Wolber and K. D. Wise, "Sensor development in the microcomputer age," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-26, no. 12, pp. 1864-1874, Dec. 1979.
- [2] R. Allen, "New applications open up for silicon sensors: a special report," *Electronics*, no. 6, pp. 113-122, Nov. 1980.
- [3] K.E. Peterson, "Silicon as a mechanical material," *IEEE Proc.*, vol. 70, no. 5, pp. 420-457, May 1982.
- [4] F.T. Geyling and J.J. Forst, "Semiconductor strain transducers," *Bell System Technical Journal*, pp. 705-731, May 1960.
- [5] W.G. Pfann and R.N. Thurston, "Semiconducting stress transducers utilizing the transverse and shear piezoresistance effects," *J. Appl. Phys.*, vol. 32, no. 10, pp. 2008-2019, Oct. 1961.
- [6] O.N. Tufte, P.W. Chapman and D. Long, "Silicon diffused-element piezoresistive diaphragms," *J. Appl. Phys.*, vol. 33, no. 11, pp. 3322-3327, Nov. 1962.

- [7] O.N. Tufte and D. Long, "Recent developments in semiconductor piezoresistive devices," *Solid-State Electronics*, vol. 6, pp. 323-338, 1963.
- [8] S.K. Clark and K.D. Wise, "Pressure sensitivity in anisotropically etched thin-diaphragm pressure sensors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-26, no. 12, pp. 1887-1896, Dec. 1979.
- [9] M. Esashi, H. Komatsu, T. Matsuo, M. Takahashi, T. Takishima, K. Imabayashi and H. Ozawa, "Fabrication of catheter-tip and sidewall miniature pressure sensors," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-29, no. 1, pp. 57-63, Jan. 1982.
- [10] S.C. Kim and K.D. Wise, "Temperature sensitivity in silicon piezoresistive pressure transducers," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-30, no. 7, pp. 802-810, July 1983.
- [11] Y.S. LEE and K.D. Wise, "A batch fabricated silicon capacitive pressure transducer with low temperature sensitivity," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-29, no. 1, pp. 42-48, Jan. 1982.
- [12] D.E. Fulkerson, "A silicon integrated circuit force sensor," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-16, no. 10, pp. 867-870, Oct. 1969.
- [13] Samaun, K.D. Wise and J.B. Angell, "An IC piezoresistive pressure sensor for biomedical instrumentation," *IEEE Trans. Biomedical Engineering*, vol. BME-20, no. 2, pp. 101-109, Mar. 1973.
- [14] J.M. Borky and K.D. Wise, "Integrated signal conditioning for silicon pressure sensors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED 26, no. 12, pp. 1906-1910, Dec. 1979.
- [15] K. Yamada, M. Nishihara, R. Kanzawa and R. Kobayashi, "A piezoresistive integrated pressure sensors," *Sensors and Actuators*, vol. 4, pp. 63-69, 1983.
- [16] H. Tanigawa, T. Ishihara, M. Hirata and K. Suzuki, "MOS integrated silicon pressure sensor," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-32, no. 7, pp. 1191-1195, July 1985.
- [17] C. Herring, "Transport properties of many-valley semiconductor," *B.S.T.J.*, vol. 34, no. 2, pp. 237-290, Mar. 1955.
- [18] C.S. Smith, "Piezoresistance effect in germanium and silicon," *Phys. Rev.*, vol. 94, no. 1, pp. 42-49, Apr. 1954.
- [19] F.T. Morin, T.H. Geballe and C. Herring, "Temperature dependence of the piezoresistance of high-purity silicon and germanium," *Phys. Rev.*, vol. 105, no. 2, pp. 525-539, Jan. 1957.
- [20] O.N. Tufte and E.L. Stelzer, "Piezoresistive properties of silicon diffused layers," *J. Appl. Phys.*, vol. 34, no. 2, pp. 313-318, Feb. 1963.
- [21] D.R. Kerr and A.G. Milnes, "Piezoresistance of diffused layers in cubic semiconductors," *J. Appl. Phys.*, vol. 34, no. 4, pp. 727-731, Apr. 1963.
- [22] O.N. Tufte and E.L. Stelzer, "Piezoresistive properties of heavily doped n-type silicon," *Phys. Rev.*, vol. 133, no. 6A, pp. 1705-A1716, Mar. 1964.
- [23] J.J. Wortman and R.A. Evans, "Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio in silicon and germanium," *J. Appl. Phys.*, vol. 36, pp. 153-156, Jan. 1965.
- [24] Y. Kanda, "A graphical representation of the piezoresistance coefficient in silicon," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-29, no. 1, pp. 64-70, Jan. 1982.
- [25] W.P. Mason and R.N. Thurston, "Use of piezoresistive materials in the measurement of displacement, force, and torque," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 29, no. 10, pp. 1096-1101, Oct. 1957.
- [26] S. Timoshenko and S.W. Krieger, *Theory of plates and shells*. McGraw-Hill Kogakusha, pp. 197-205, 1970.
- [27] T.N. Jackson, M.A. Tischler and K.D. Wise, "An electrochemical P-N junction etch-stop for the formation of silicon microstructures," *IEEE Electron Devices Letters*, vol. EDL-2, no. 2, pp. 44-45, Feb. 1981.
- [28] R.A. Heinz, J.T. Chuss and C.M. Schraeder, "Double-sided photolithography," *S.P.I.E.*, vol. 135, pp. 147-152, 1978.