

# 擴散抵抗을 이용한 실리콘 壓力센서

## (Silicon Pressure Sensors Using Diffused Resistors)

權 泰 夏\*, 李 宇 一\*\*

(Tae Ha Kwon and Wu Il Lee)

### 要 約

P-N接合腐蝕停止法을 이용해서 넓이가  $1 \times 1 \text{mm}^2$ 이며 두께가  $10 \mu\text{m}$  및  $20 \mu\text{m}$ 인 실리콘 다이아프램을 만들었다. 이 다이아프램 위에 P形 擴散抵抗을 形成하여 抵抗의 位置에 따라 壓力에 대한 抵抗變化를 調査하였다. 抵抗變化는 다이아프램의 두께, 抵抗의 位置 및 抵抗의 길이등에 의존하는 것으로 나타났다.

$1.2 \text{ k}\Omega$ 의 抵抗을 두께가  $10 \mu\text{m}$ 인 Si 다이아프램 위에 브리지 形態로 形成한 壓力센서의 壓力感度は  $42 \mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{mmHg}$ 였으며,  $0 \sim 300 \text{mmHg}$ 의 壓力範圍에서 좋은 直線性을 보였다. 이 素子の 溫度係數는  $2.3 \text{ mmHg}/^\circ\text{C}$ 였다.

### Abstract

Silicon diaphragms, 10 and 20  $\mu\text{m}$ -thick and  $1 \times 1 \text{mm}^2$  area, have been fabricated by means of the electrochemical P-N junction etch-stop technique. The P-type diffused resistors were formed on the diaphragm, and the piezoresistance effect was examined. It has been found that the fractional variation of the resistance is dependent on the diaphragm thickness, resistor location, and resistor length, etc. The  $1.2 \text{ k}\Omega$  full-bridge pressure sensor with  $10 \mu\text{m}$ -thick diaphragm exhibits a pressure sensitivity of  $42 \mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{mmHg}$  with a temperature coefficient of  $2.3 \text{ mmHg}/^\circ\text{C}$ , and shows a good linearity in the pressure range from 0 to 300 mmHg.

### I. 序 論

최근 情報處理의 高度化에 따라 自動化 器機들의 役割이 擴大됨과 아울러 이것을 가능케하는 적절한 센서의 開發의 중요성이 漸高되고 있다. 壓力을 電氣的인 信號로 변환시키는 실리콘 壓力센서는 産業 및 醫學界 등에서 應用될 수 있으며,<sup>[1]</sup> 그 중에서도 확산저항형 센서는 소형, 고감도, 고신뢰성등 우수한 特性을

가지고 있을 뿐만 아니라 半導體 planar技術을 이용해서 만들 수 있기 때문에 大量生産에 보다 적합하다.

1954년 Smith<sup>[2]</sup>가 Ge와 Si의 압저항(piezoresistance) 效果에 관한 基礎的 研究를 發表했다. 이어서 1955년 Herring<sup>[3]</sup>은 압저항효과를 many-valley conduction/valence-band model로써 說明했다. 이說明에 의하면 物體에 應力이 加해지면 格子變形이 일어나며 이 格子變形의 效果는 한 계곡(valley)에서 다른 계곡으로 캐리어를 산란시킨다. 이 結果 캐리어의 分布와 實効移動도가 變化되며 이것이 抵抗率의 變化를 誘發시킨다. 1957년 Mason等<sup>[4]</sup>은 이 效果를 變位나 토크 등의 測定에 應用할 수 있음을 報告했다. 1962년 Tufte等<sup>[5]</sup>은 처음으로 單結晶 Si를 다이아프램으로 만들고 그 위에 擴散抵抗을 形成하여 이의 壓力特性을 檢討하였다. 그후 Si부식기술의 發展에

\*正會員, 釜山水産大學 電子通信工學科  
(Dept. of Electronics and Communication Eng.,  
National Fisheries Univ. of Pusan)

\*\*正會員, 慶北大學校 工科大學 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Kyungpook National Univ.)  
接受日字: 1985年 7月 1日

따라 다이아프램의 製作方法 및 여러가지 形態의 Si 압력센서에 대한 研究가 多數 發表되었다.<sup>17-18)</sup>

本 研究에서는 P-N接合腐蝕停止法<sup>17)</sup>을 利用해서 面積이 1×1mm<sup>2</sup>이며 두께가 10μm 및 20μm인 두 종류의 Si 다이아프램을 만들었다. 이 다이아프램 위에 硼素를 擴散시켜서 擴散抵抗을 만들고 다이아프램의 두께 및 擴散抵抗의 位置에 따른 壓抵抗特性을 調査하여, 壓力에 대한 抵抗의 變化率이 가장 큰 位置에 브리지 形態로 擴散抵抗을 形成하고 미소형의 압력센서를 製造하여 이들 素子의 壓力特性을 調査하였다.

II. 實 驗

應力이 加해질때 擴散抵抗의 抵抗變化率  $\Delta R/R$ 은

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_{11}\sigma_{11} + \pi_{12}\sigma_{22} \quad (1)$$

로 표시된다. 여기서  $\pi_{11}$ 과  $\pi_{12}$ 은 抵抗의 길이에 平行한 壓抵抗係數 및 垂直한 壓抵抗係數이며  $\sigma_{11}$ 과  $\sigma_{22}$ 은 擴散抵抗과 平行한 應力成分과 垂直한 應力成分을 나타낸다. 한 변의 길이가 l이고 두께가 h인 다이아프램상에서 位置에 따른 應力은

$$\sigma = A \frac{Pl^2}{h^2} \quad (2)$$

이다. 여기서 A는 材料와 位置에 따라 決定되는 상수이며 P는 壓力을 나타낸다. 따라서 抵抗率化率을 크게하기 위해서는 應력과 壓抵抗係數가 커야한다.

1. 다이아프램의 製作

實驗에서는 P형기판에 에피택셜 成長法을 利用해서 N형박막을 成長시킨 Si 웨이퍼를 사용했다. P형기판은 抵抗率이 18-22Ω·cm, 두께가 160μm, 結晶面이 (100), 直徑이 3인치의 것이었으며, 成長시킨 N형은 抵抗率이 15-28Ω·cm, 두께가 10μm 및 20μm의 것이었다.

化學藥品을 使用해서 濕式으로 Si를 腐蝕시킬 경우 腐蝕率은 腐蝕液의 溫度나 Si의 結晶面에 따라서 顯著的한 差異를 나타낸다. NH<sub>2</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>NH<sub>2</sub><sup>19)</sup>, KOH<sup>19)</sup>, N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O<sup>20)</sup> 등의 異方性腐蝕液의 腐蝕率은 (111)面보다 (100)面に 대해서 훨씬 크다. 특히 NH<sub>2</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>NH<sub>2</sub> 및 KOH는 Si에 不純物로 使用된 硼素의 濃度가 10<sup>20</sup>cm<sup>-3</sup>以上이 되면 顯著的한 腐蝕率의 減少를 나타낸다. 반면 HF와 같은 等方性腐蝕液은 結晶面에 관계없이 거의 일정한 腐蝕率을 나타낸다.<sup>12)</sup>

Si 압력센서는 그림 1에 나타난 바와 같이 다이아프램 위에 擴散抵抗을 形成한 것이며 式(2)에서 알 수 있듯이 다이아프램의 두께는 應力에 銳敏하게 作用

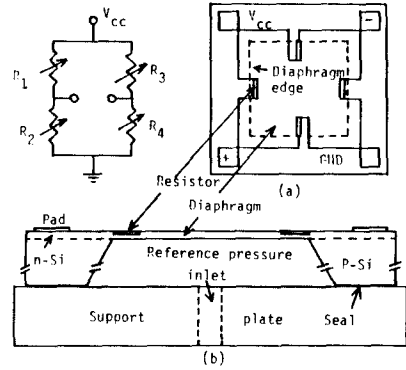


그림 1. 실리콘 압력센서의 構造

(a) 平面圖 (b) 側面圖

Fig. 1. Typical structure of a silicon piezoresistive pressure sensor. (a) Topview (b) Cross section.

한다. 따라서 壓力感度を 높이기 위해서는 다이아프램의 두께를 가급적 얇게하고 또 均一하도록 正確하게 制御하는 것이 대단히 중요하다.

本 實驗에서는 P-N接合腐蝕停止法으로 Si를 腐蝕시켜 다이아프램을 製作하였다. 이 方法은 P-N接合에서 腐蝕시키지 않을 쪽(P 혹은 N)에 (+)電極을 연결하고 백금판에 (-)電極을 연결하여 電極이 연결되지 않은 쪽의 Si를 腐蝕시키는 것이다. 이 腐蝕法에서는 다이아프램의 두께를 에피택셜 成長法으로 조절할 수 있어서 比較的 精確한 두께의 다이아프램을 만들 수 있다. 이때 使用한 腐蝕液은 NH<sub>2</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>NH<sub>2</sub> - C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>O를 75ml - 12g - 24ml로 混合한 것이며, 腐蝕液의 溫度는 110±0.5℃로 維持 하였다. 그림 2는 다이아프램 製作時에 使用된 腐蝕裝置를 나타낸 것이다.

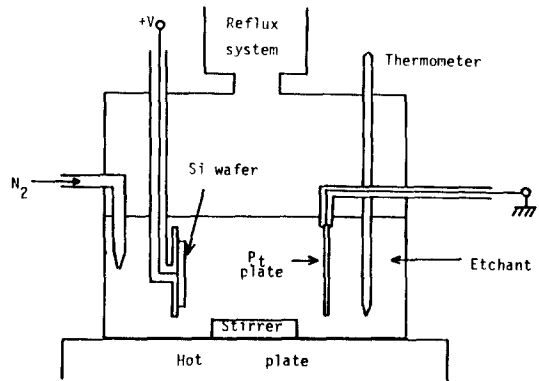


그림 2. 腐蝕裝置

Fig. 2. Etching system used for the electrochemical etch-stop technique.

N형 Si表面에 Cr과 Au를 차례로 各各 500 Å 및 1 $\mu$ m 정도의 두께로 진공증착하여 (+)電極으로 하고 (-)電極으로는 3 $\times$ 3cm<sup>2</sup>의 백금판을 써서 이들 사이에 약 0.4V의 電壓을 加해서 P형 Si를 腐蝕하였다.

NH<sub>2</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>NH<sub>2</sub> 腐蝕液에 대한 (100)面の 腐蝕率은 (111)面の 그것의 35倍 정도이다.<sup>12)</sup> 또 [110]方向과 (111)面이 이루는 角이 54.74°이기 때문에 두께 160 $\mu$ m을 腐蝕시켜 1 $\times$ 1 mm<sup>2</sup>의 다이아프램을 만들기 위해서 腐蝕시킬 表面의 넓이를 1.226  $\times$  1.226mm<sup>2</sup>으로 設計하고, 이 部分의 SiO<sub>2</sub>를 除去하였다.

Si 웨이퍼를 腐蝕液에 넣으면 SiO<sub>2</sub>가 除去된 部分에서 腐蝕反應이 일어난다. 電壓을 가하지 않았을 때는 약 1mA의 電流가 흐르나 0.4V의 電壓을 가하면 약 5mA의 電流가 흐르기 시작한다. 이 電流는 서서히 減少해서 2mA 정도로 된다. 이때 腐蝕은 停止되나 腐蝕이 停止된 후에도 이 값은 계속 유지된다. 電壓을 걸었을 때의 腐蝕率은 2.35 $\mu$ m/min 정도로 電壓을 가하지 않을 때의 腐蝕率의 약 2倍였다. 그림 3은 이렇게 製作한 다이아프램을 나타낸 것이며, (a)는 腐蝕面의 平面사진이고 (b)는 다이아프램의 가장자리 근처의 측면사진이다.

## 2. 素子の 製造

P形 擴散抵抗의 壓抵抗係數는 (100)面에서는 [110]方向으로 位置할 때 가장 크므로,<sup>16)</sup> Si 웨이퍼를 [110]方向으로 나란하게 잘라서 擴散抵抗을 그 方向과 一致되도록 形成하는데 편리하게 하였다. 잘라진 웨이퍼의 크기는 2.5 $\times$ 2.5cm<sup>2</sup> 정도이며 이것은 作業時 취급이 용이한 크기이다.

이 웨이퍼를 標準洗滌工程에 따라 洗滌한 다음 1100°C의 수증기/산소분위기에서 4000 Å 정도의 SiO<sub>2</sub>膜을 成長시켰다. 그림 1(b)에서 알 수 있듯이 擴散抵抗은 웨이퍼의 앞면에 形成하나, 다이아프램을 만들기 위해서는 웨이퍼의 뒷면에서 腐蝕시켜야 하므로 웨이퍼의 앞면과 뒷면에 마스크 整列用標織를 만들었다.

擴散抵抗用 창을 열고 950°C에서 35분간 P형 不純物源인 BN 웨이퍼(boron nitride wafer)로 硼素를 predeposition했다. 이때 生成된 BSG(borosilicate glass)를 약 700°C의 수증기/산소분위기에서 15분간 저온 산화시킨 후 buffered HF 溶液으로 除去했다. 硼素의 out diffusion을 줄이기 위해서 1100°C의 건조 산소 분위기에서 10분간, 그리고 같은 溫度의 증기 산소 분위기에서 90분간 차례로 drive-in 하였다. N형 Si와 金屬과의 음성 接觸을 만들기 위하여 擴散 창을 열

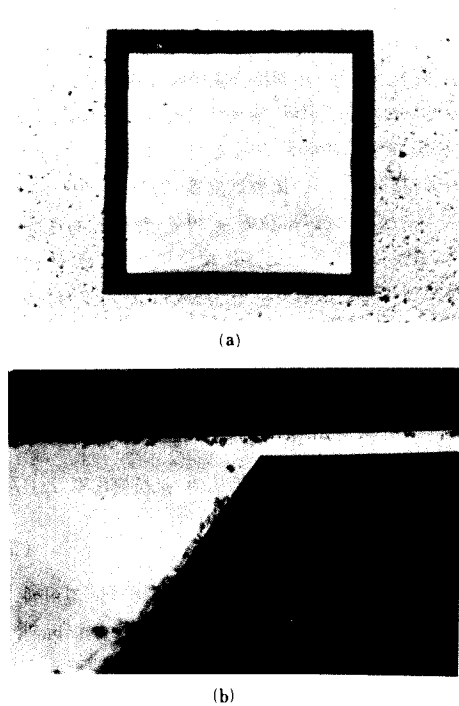


그림 3. 실리콘 다이아프램 (a) 평면도 (b) 다이아프램의 가장자리 근처의 측면도

Fig. 3. Silicon diaphragm realized using the electrochemical etch-stop technique. (a) Top view of 1mm<sup>2</sup> diaphragm (b) Cross section of the diaphragm edge.

고 950°C에서 15분간 POCl<sub>3</sub>로 磷을 predeposition한 후 역시 buffered HF 溶液으로 PSG (phosphosilicate glass)를 除去했다.

P形 Si를 腐蝕시킬때 電極으로 使用할 Cr과 Au를 차례로 各各 500 Å 및 1 $\mu$ m의 두께로 N형 表面에 진공증착 하였다. 그림 2와 같은 裝置로 擴散抵抗이 있는 뒷 部分의 P형 Si를 부식시켜서 두께가 10 $\mu$ m 및 20 $\mu$ m인 두 종류의 다이아프램을 만들었다. 이어서 Cr과 Au를 各各의 腐蝕液으로 除去한 후 부식 마스크로 使用된 SiO<sub>2</sub>를 除去하고 1100°C의 수증기/산소분위기에서 30분간 N형 不純物을 drive-in 하였다. 이때 擴散抵抗의 面抵抗은 200  $\Omega/\square$  정도였으며, 接合의 깊이는 2.5 $\mu$ m 정도였고, 不純物의 濃度は 10<sup>19</sup>cm<sup>-3</sup> 정도였다.

電極을 形成하기 위하여 電極 接觸창을 열고 Al을 1.2 $\mu$ m 정도의 두께로 진공증착한 후 약 450°C에서 25분간 熱處理 하였다.

그림 4는 다이아프램 위에서의 位置에 따른 抵抗의 壓抵抗變化를 調査하기 위하여 폭이 20 $\mu$ m, 길이가

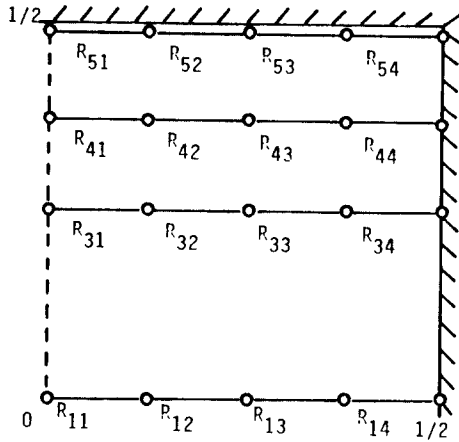


그림 4. 다이어프램 위의 壓抵抗變化를 調査하기 위한 抵抗의 排置

Fig. 4. Arrangement of resistors for piezoresistance variation on the diaphragm.

80 $\mu$ m이며 저항값이 약 800 $\Omega$ 인 여러개의 擴散抵抗의 排列을 나타낸 것이다. 이것은 다이어프램을 4等分한 것의 하나이다.

抵抗의 變化率이 가장 크게 나타난 位置에 擴散抵抗을 形成하여 그림 1과 같은 브리지 形態의 압력센서를 製造하였다. 이 抵抗의 面抵抗은 역시 200 $\Omega$  /  $\square$  정도이며 저항값은 1.2k $\Omega$  정도가 되도록 만들었다. 이 압력센서의 크기는 3 $\times$ 3 $\times$ 0.17mm<sup>3</sup> 정도이다.

III. 結果 및 考察

두께가 10 $\mu$ m인 다이어프램 위의 抵抗의 位置에 따른 壓抵抗變化를 表 1에 나타내었다. 이때의 壓力變化는 0~100mmHg로 하였다. 여기서  $\Delta R$ 은 壓力 100mmHg에서의 저항값과 0mmHg에서의 저항값의 차이

다. 다이어프램의 변의 중앙에서 그 변에 垂直으로 位置한 抵抗  $R_{1i}$ 는 壓力에 따라 가장 큰 저항값의 增加를 보였으며, 이 변과 直角인 변의 中央에서 그 변에 平行하게 位置한 抵抗  $R_{5i}$ 는 壓力에 따라 가장 큰 저항값의 減少를 나타냈다. 이것은 다이어프램 위에서는 應力變化가 큰 경우 抵抗값의 變化도 크다는 것을 뜻한다. 또한 抵抗變化가 큰 抵抗의 길이를 길게 하면 抵抗變化率은 오히려 작아진다. 따라서 壓力感度を 높이기 위해서는 抵抗을 다이어프램의 변의 中央에서 그 변에 가깝게 位置시키고, 抵抗의 길이를 짧게 하는 것이 바람직하다. 브리지 形態로 만들어진 압력센서는 offset電壓이 0이 되는 것이 바람직하다. 이를 위해서는 4개의 저항값이 一致해야 하는데 抵抗의 길이가 짧아지면, 상대적으로 오차는 커져서 이것이 어려워진다.

그림 5는 抵抗의 變化率이 큰 두개의 抵抗을 택해서 壓力에 따른 抵抗變化를 나타낸 것이다. 여기서 다이어프램의 두께가 얇은 쪽이 壓力에 대해 큰 抵抗變化를 나타낸다는 것을 알 수 있다. 이들은 모두 0~300mmHg의 壓力範圍에서 좋은 直線性을 보였다.

그림 6은 이들 抵抗의 溫度에 따른 저항값의 變化를 나타낸 것이다. 이것은 0 $^{\circ}$ C에서의 저항값으로 規準化한 것이며 80 $^{\circ}$ C에서 약 12%의 저항값 變化를 나타내었다.

그림 7은 壓力을 0에서 100mmHg로 變化시킨 경우 10 $\mu$ m의 다이어프램 위에 位置한 抵抗  $R_{1i}$ 의 溫度에 따른 抵抗變化率을 나타낸 것이다. 抵抗變化率은 溫度가 上昇함에 따라 微小하게 減少하였다.

그림 8은 抵抗變化가 크게 나타나는 位置에 4개의 擴散抵抗을 形成하여 브리지 形態로 만든 저항형 압력센서의 壓力特性을 나타낸 것이다. 다이어프램의 두

표 1. 抵抗의 位置에 따른 壓抵抗變化  
Table 1. Fractional resistance change with pressure on different positions(20 $^{\circ}$ C).

Resistor	R (ohms) @ 0 mmHg	R (ohms) @ 100mmHg	$\Delta R/R$ ( $\times 10^3$ )	Resistor	R (ohms) @ 0 mmHg	R (ohms) @ 100mmHg	$\Delta R/R$ ( $\times 10^3$ )
R <sub>11</sub>	821.5	821.0	-0.6	R <sub>11</sub>	817.0	815.5	-1.8
R <sub>12</sub>	825.3	825.3	-	R <sub>12</sub>	818.5	817.5	-1.2
R <sub>13</sub>	834.0	835.2	1.4	R <sub>13</sub>	829.2	829.2	-
R <sub>14</sub>	829.7	833.6	4.7	R <sub>14</sub>	836.4	837.8	1.7
R <sub>31</sub>	837.0	836.0	-1.2	R <sub>31</sub>	805.6	801.9	-4.6
R <sub>32</sub>	831.5	831.0	-0.6	R <sub>32</sub>	823.4	820.3	-3.8
R <sub>33</sub>	807.8	808.2	0.5	R <sub>33</sub>	828.7	817.5	-1.5
R <sub>34</sub>	811.3	814.0	3.3	R <sub>34</sub>	832.3	832.3	-
R <sub>14</sub> +R <sub>13</sub>	1,663.7	1,668.7	3.0	R <sub>51</sub> +R <sub>52</sub>	1,629.0	1,622.6	-3.9

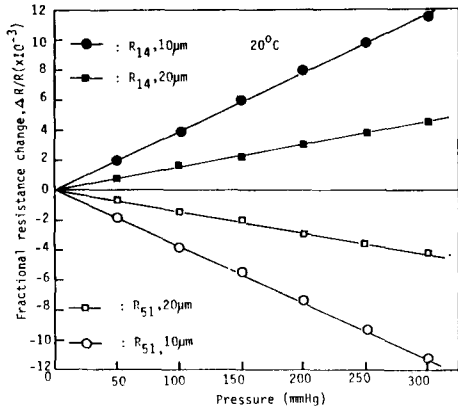


그림 5. 두께가 다른 다이어프램에 位置한 抵抗의 壓力에 대한 抵抗變化

Fig. 5. Fractional resistance change versus pressure of resistors on diaphragms of different thickness.

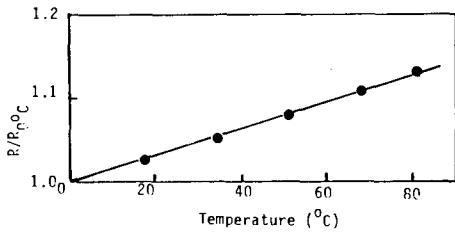


그림 6. 溫度에 대한 저항값의 變化. 0°C에서의 저항값으로 規準化 하였다

Fig. 6. Variation of the resistance with temperature for P-type resistor. The resistance values are normalized to the 0°C values.

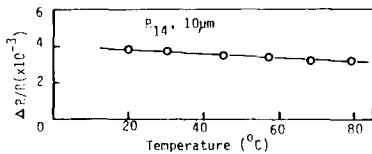


그림 7. 壓力을 0에서 100mmHg로 變化시킨 경우의 R<sub>14</sub>의 溫度變化에 대한 抵抗變化率

Fig. 7. Variation of  $\Delta R/R$  with temperature for  $R_{14}$  when the pressure was changed from 0 to 100mmHg.

두께가 10 $\mu$ m인 센서의 感度는 42 $\mu$ V/V $\cdot$ mmHg였으며, 20 $\mu$ m인 것의 感度는 16 $\mu$ V/V $\cdot$ mmHg였다. 이때 供給電壓은 5V였다. 다이어프램의 두께가 10 $\mu$ m인 素子の 溫度特性은 96ppm/°C였으며, 이것은 2.3mmHg/°C에 해당되는 것이다.

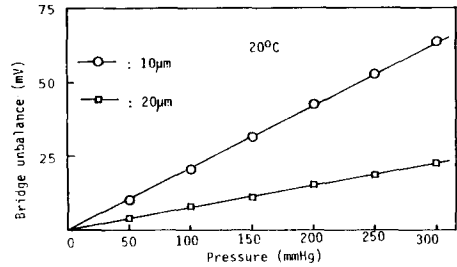


그림 8. 두께가 다른 압력센서의 壓力感度

Fig. 8. Pressure sensitivity of the sensors with different diaphragm thickness.

IV. 結 論

P-N接合腐蝕停止法을 이용해서 넓이가 1×1mm<sup>2</sup>이며 두께가 약 10 $\mu$ m 및 20 $\mu$ m인 두 종류의 다이어프램을 製作하였다. 이때 0.4V정도의 電壓을 가하였으며, 電流는 腐蝕 初期의 5mA에서 腐蝕 終了時에는 2mA로 減少하였다. 腐蝕率은 2.35 $\mu$ m/min 정도였다.

이 다이어프램 위에 크기가 20×80 $\mu$ m<sup>2</sup>이며, 면저항이 200 $\Omega$ /□인 P형 擴散抵抗을 形成하였다. 이것으로 조사한 抵抗의 位置에 따른 壓力에 대한 抵抗變化는 다이어프램의 변의 中央에서 그 변에 가깝게 位置한 抵抗일수록 크게 나타났다. 변의 中央에서 그 변에 가장 가깝고 수직하게 位置한 抵抗은 壓力增加에 따라 가장 큰 저항값의 增加를 보였으며, 또 이와 直角인 변의 中央에서 그 변에 가장 가깝고 平行하게 位置한 抵抗은 壓力增加에 따라 가장 큰 저항값의 減少를 나타냈다.

크기가 20×120 $\mu$ m<sup>2</sup>이며 面抵抗이 200 $\Omega$ /□인 P형 抵抗으로 만들어진 브리지 形態의 壓力센서는, 다이어프램의 두께가 10 $\mu$ m 및 20 $\mu$ m인 경우 各各 42 $\mu$ V/V $\cdot$ mmHg와 16 $\mu$ V/V $\cdot$ mmHg의 壓力感度を 나타냈다. 溫度特性은 96ppm/°C였으며, 이것은 2.3mmHg/°C에 대응된다. 그리고 이 素子는 0~300mmHg의 壓力범위에서 좋은 직선성을 보였다.

壓力感度は 다이어프램의 두께가 얇고, 抵抗의 位置가 다이어프램의 邊의 中央에서 그 邊에 가까울수록 그리고 抵抗의 길이가 짧을수록 커지는 것을 알수 있었다. 그러나 다이어프램의 두께가 얇아지면 測定壓力의 範圍가 좁아지며, 抵抗의 길이가 짧아지면 저항값의 상대적 오차는 커진다.

參 考 文 獻

[1] R. Allan, "New applications open up for

- silicon sensors: a special report," *Electronics*, Nov. 6, pp. 113-122, 1980.
- [2] K.E. Petersen, "Silicon as a mechanical material," *Proc. IEEE*, vol. 70, no. 5, pp. 420-457, May, 1982.
- [3] C.S. Smith, "Piezoresistance effect in germanium and silicon," *Phys. Rev.*, vol. 94, no. 1, pp. 42-29, Apr., 1954.
- [4] C. Herring, "Transport properties of a many-valley semiconductor," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 34, no. 2, pp. 237-296, Mar., 1955.
- [5] 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. 1097-1101, Oct., 1957.
- [6] O.N. Tufte, P.W. Chapman, and D. Long, "Silicon diffused-element piezoresistive diaphragm," *J. Appl. Phys.*, vol. 33, no. 11, pp. 3322-3327, Nov., 1962.
- [7] Samaun, K.D. Wise, and J.B. Angell, "An IC piezoresistive pressure sensor for biomedical instrumentation," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. BME-20, no. 2, pp. 101-109, Mar., 1973.
- [8] W.D. Frobenius, A.C. Sanderson, and H.C. Nathanson, "A microminiature solid-state capacitive blood pressure transducer with improved sensitivity," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. BME-20, no. 4, pp. 312-314, July, 1973.
- [9] 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.
- [10] W.H. Ko, J. Hyneczek, and S.F. Boettcher, "Development of a miniature pressure transducer for biomedical applications," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-26, no. 12, pp. 1896-1905, Dec., 1979.
- [11] C.S. Sander, J.W. Knutti, and J.D. Meindl, "A monolithic capacitive pressure sensor with pulse-period output," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-27, no. 5, pp. 927-930, May, 1980.
- [12] K.W. Lee and K.D. Wise, "SENSIM: A simulation program for solid-state pressure sensors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-29, no. 1, pp. 34-41, Jan., 1982.
- [13] 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.
- [14] M. Esashi, H. Komatsu, 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.
- [15] 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.
- [16] P.J. French and A.P. Dorey, "Frequency output piezoresistive pressure sensor," *Sensors and Actuators*, no. 4, pp. 77-83, 1983.
- [17] 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 Device Lett.*, vol. EDL-2, no. 2, Feb., 1981.
- [18] E. Bassous, "Fabrication of novel three-dimensional microstructures by the anisotropic etching of (100) and (110) silicon," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-25, no. 10, pp. 1178-1185, Oct., 1978.
- [19] K.E. Bean, "Anisotropic etching of Silicon," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-25, no. 10, pp. 1185-1193, Oct., 1978.
- [20] D.B. Lee, "Anisotropic etching of silicon," *J. Appl. Phys.*, vol. 40, no. 11, pp. 4569-4574, Oct., 1969.