

실리콘 압저항 압력센서의 오프셋 및 온도 드리프트 개선

김재문*, 이영태**, 서희돈*, 최세곤*

The Improvement in Offset and Temperature Drift
on Silicon Piezoresistive Pressure Sensor

Jae-Mun Kim, Young-Tae Lee, Hee-Don Seo and Se-Gon Choi

요 약

이 논문은 압력센서의 압저항 소자 값에 영향을 미치는 실리콘 박막의 잔류응력과 4개 저항의 특성 차에 의해 발생하는 오프셋과 온도 드리프트 특성을 보상하기 위하여 2중 브리지구조의 압력센서에 대하여 연구한 것이다. 압력 변화에 무관한 브리지회로의 각 저항 소자를 압력 변화를 감지하는 브리지회로의 각 저항 소자 가까이 배치하여 각 브리지회로의 출력을 감산하므로 오프셋과 온도 드리프트를 소자내부에서 제거하는 것이다. 이 방법에 의해 오프셋과 온도 드리프트 성분의 약 95%가 제거되었다. 제작된 압력센서의 감도는 0.9 kgfcm^{-2} full-range에 대해서 $11.7 \text{ mV/Vkgfcm}^{-2}$ 이었다.

Abstract

In order to reduce the offset and its temperature drift by the different properties of the piezoresistors and the residual stress of the piezoresistive pressure sensor, a double Wheatstone-bridge pressure sensor was studied. Because the compensation bridge was arranged near by the pressure sensitive bridge, which have the similar offset component, reduction of the offset and its temperature drift was realized by the mathematical subtraction of the output of two bridges. It was configured the compensation of the offset and its temperature drift. By this compensation method, the offset and its temperature drift were reduced approximately 95% respectively. The sensitivity of the fabricated pressure sensor was $11.7 \text{ mV/Vkgfcm}^{-2}$ for 0.9 kgfcm^{-2} full-scale pressure range.

1. 서론

압저항(piezoresistivity) 효과를 이용한 실리콘 압력 센서는 고감도, 고신뢰성이면서 출력 직선성이 좋고,

* 영남대학교 전자공학과
(Department of Electronic Engineering Yeung-Nam University)

** 안동대학교 전자공학교육과
(Department of Electronic Engineering Education An-Dong University)

<접수일자 : 1996년 4월 3일>

대량생산이 가능하므로 일반공업용, 자동차용, 의료용 등 여러 분야에 응용되고 있다.^[1,2,3]

압저항형 압력센서는 일반적으로 4개의 압저항을 휘트스톤 브리지(Wheatstone bridge)로 구성해서 압력에 의한 응력에 비례하는 압저항의 저항변화를 검출한다. 그러나 휘트스톤 브리지를 이용하는 압력센서에는 여러가지 원인, 특히 센서를 구성하는 재료들의 열팽창계수 차에 의해 발생하는 잔류응력과 불균일한 불순물 농도에 의해 발생하는 4개 저항의 특성 차이 때문에 오프셋(offset)이 발생할 뿐 아니라 그 오프셋이 온도의 의존성이 있고, 압저항 및 압저항계수가 온도의존성을

갖는 것이 문제가 되고 있다. 이러한 오프셋을 보상하는 방법으로 제작된 압력센서에 외부보상회로를 구성하는 방법^[4]이 있지만 각 소자마다 특성이 조금씩 서로 다르기 때문에 소자 하나 하나의 오프셋을 보상하는 것은 효과적인 방법이 못된다. 그리고 온도드리프트는 보상이 되지 않는다.

본 논문에서는 압저항 압력센서에서 가장 문제가 되고 있는 오프셋과 온도드리프트를 보상하는 새로운 방법을 제안하고, 이 방법으로 설계된 센서에 대하여 유한요소 모델링(FEM)으로 해석하고, 마이크로머시닝 기술과 IC 제조기술로 제작한 센서의 특성을 평가한다.

2. 보상원리 및 소자설계

실리콘 압저항센서에 있어서 압력 검출부분인 휘트스톤 브리지를 이루고 있는 P형 압저항들은 (100) 다이아프램 면 위에 <110>방향으로 설계되어 있다. 이 저항 소자들은 다이아프램에 압력이 인가 될 때 다이아프램 면의 변형에 따른 응력(stress)에 의해 그 값들이 변화하게 된다.

실제 센서에서 그 변화량은 4개 저항값의 편차와 실리콘과 산화막(SiO₂)간의 열 팽창계수 차에 의한 잔류응력을 고려할 때 식(1)과 같이 나타난다.^[5]

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{2} \pi_{44} [(\sigma_x - \sigma_y) + (\sigma_m - \sigma_n)] + \beta \quad (1)$$

여기서 비례상수 π_{44} 는 압저항계수이고, σ_x 와 σ_y 는 각각 압저항의 전류방향(저항소자의 길이방향) 응력 성분 및 그의 수직방향 응력 성분이며, σ_m 와 σ_n 는 전류방향 및 그의 직각방향으로 발생하는 잔류응력이다. 또, β 는 각 저항값의 편차에 기인하는 센서 출력의 오프셋 성분이다.

이 식에서 알 수 있듯이 압저항 압력센서의 출력은 압력에 의한 성분, 잔류 응력에 의한 오프셋 성분과 압저항 값의 편차에 의한 오프셋 성분으로 나눌 수 있다. 식(1)에서 잔류응력 σ_r 은 온도에 대해서 다음 식(2)와 같은 관계가 있다.^[6]

$$\sigma_r = \frac{E_f}{1 - \nu_f} (\alpha_f - \alpha_s) \Delta T \quad (2)$$

α_f 와 α_s 는 산화막과 실리콘 기판(substrate)의 열

팽창계수이고, ΔT 는 산화막을 성장(증착)시켰을 때 온도와 센서 사용온도와의 차이이다. 또 E_f 와 ν_f 는 각각 young's modulus와 poisson's ratio이다. 식(2)에서 잔류응력은 온도 의존성이 있다는 것을 알 수 있고, 식(1)의 β 성분도 각 저항의 불순물 농도 차에 의해 온도계수가 달라지므로, 결국 온도 의존성을 갖는다.

이 식(1)로부터 오프셋 온도특성(temperature coefficients of the offset ; TCO), 즉 압력이 인가되지 않을 때 오프셋의 온도변화는 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.^[7]

$$TCO = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \pi_{44}}{\partial T} (\sigma_m - \sigma_n) + \pi_{44} \frac{\partial (\sigma_m - \sigma_n)}{\partial T} \right] + \frac{\partial \beta}{\partial T} \quad (3)$$

이 식에서 센서의 영점 오프셋이 온도변화에 따라 크게 변하는 것을 알 수 있다.

또 식(1)의 첫째 항에 의해 얻어지는 센서의 출력 감도(sensitivity)도 압저항의 불순물 농도에 의존하고, 온도변화에 민감하다.^[8] 즉, 불순물 농도가 감소하면 센서의 감도는 높아지지만 감도의 온도의존성은 커진다. 반대로 불순물 농도를 증가시키면 온도의존성은 떨어진다. 그러나 감도도 낮아진다.

압력센서를 전류구동할 경우 출력감도는 식(4)와 같다.

$$\Delta V_0 = \frac{1}{2} \pi_{44} (\sigma_x - \sigma_y) IR \quad (4)$$

이 감도의 온도특성은 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{\partial \Delta V_0}{\partial T} = \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) IR \left(\frac{\partial \pi_{44}}{\partial T} + \pi_{44} \frac{\partial R}{\partial T} \right) \quad (5)$$

여기서 $\partial \pi_{44} / \partial T$ 는 음(-)의 값이고, $\partial R / \partial T$ 는 양(+)의 값이므로 식(5)에서 알 수 있듯이 압저항 표면 불순물 농도를 제어하므로 감도의 온도의존성을 줄일 수 있지만, 센서감도와 관계가 충분히 고려되어야 한다.

본 연구에서는 앞에서 언급한 오프셋 성분들과 그들의 온도 드리프트 특성을 보상하기 위해 식(1)과 같이 3가지 성분의 데이터를 각각 측정할 수 있도록 그림 1과 같은 센서 구조로 설계하였다. 이 센서구조의 특징은 정방향 다이아프램 위에 압력 검출용 브리지(내부 브리지) 저항 $R_1 \sim R_4$ 와 바로 옆 프레임 위에 보상용 브리지(외부 브리지) 저항 $R'_1 \sim R'_4$ 를 배치한 것

이다. 그림에서 알 수 있듯이 압력 검출용 브리지의 두 저항은 전류축 방향의 응력을 감지하도록 되어 있고, 다른 두 저항은 전류축의 수직방향의 응력을 감지하도록 설계되었다. 그러나 외부 보상용 브리지의 저항들은 모두 전류방향에 수직인 응력을 검출하도록 설계되어 있기 때문에 4개의 저항값의 변화가 동일하다. 결과적으로 이들 두 브리지 저항들의 전기적 특성은 동일하지만 압력변화에 따른 저항값의 변화는 다르다. 즉 내부 브리지는 압력변화에 민감하지만 외부 브리지는 압력변화의 영향을 받지 않는다.

그림 2에 이 센서를 전류 구동할 경우의 등가회로를 나타냈다. 압력이 인가되지 않은 초기상태에 있어서 압력 검출용 브리지의 저항값의 변화 $(\frac{\Delta R}{R})_{det}$ 는 식(6)와 같이 주어지고 보상용 브리지 저항값의 변화 $(\frac{\Delta R}{R})_{com}$ 는 식(7)과 같다.

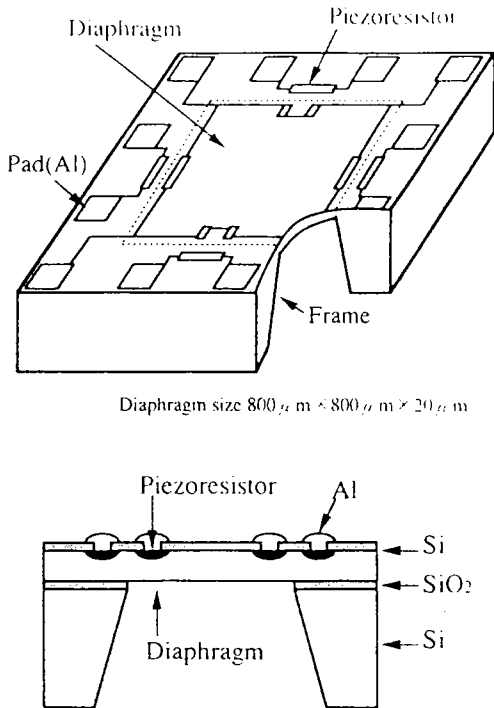


그림 1. 이중 휘트스톤 브리지를 가진 압저항 압력 센서의 구조

Fig. 1. Structure of the Piezoresistive pressure sensor with double wheatstone bridge configuration.

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{det(\beta=0)} = \frac{1}{2} \pi_{44}(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) + \beta \quad (6)$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{com(\beta=0)} = \beta \quad (7)$$

즉 압력 검출용 브리지는 잔류응력에 의한 오프셋성분과 4개 압저항 값 편차에 의한 오프셋 성분을 포함하고 있지만, 외부 보상용 브리지는 저항 특성 편차에 의한 오프셋 성분만 포함하게 된다. 그러므로 압력 검출용 브리지의 오프셋 값이 보상용 브리지 오프셋 값보다 더 크게 나타난다.

보상용 브리지를 압력 검출용 브리지 바로 옆에 배치하여 동일한 특성을 갖도록 설계하였기 때문에 식(6)과 (7)의 β 값은 거의 같은 값이다. 그러므로, 보상용 브리지 출력을 측정하므로 β 성분 값을 구할 수 있고, 두 식을 외부회로를 이용하여 감소하므로 잔류응력에 의한 오프셋 성분을 구할 수 있다. 이 결과를 이용하면 식(1)의 3가지 성분 값을 알 수 있다.

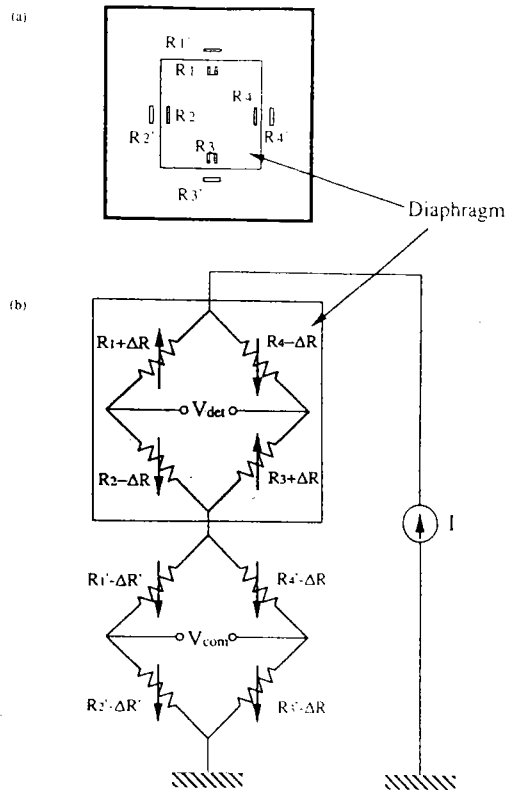


그림 2. 이중 휘트스톤 브리지의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of the double wheatstone bridge structure.

보상원리를 구체적으로 설명하기 위하여 압력센서의 압력검출용 브리지와 오프셋 보상용 브리지의 출력을 다음과 같이 모델링한다.

$$V_{det} = \alpha_{det}T + \beta_{det} + \gamma_{det} + \pi_{det}P \quad (8)$$

$$V_{com} = \alpha_{com}T + \beta_{com} + \gamma_{com} + \pi_{com}P \quad (9)$$

여기서 α 는 오프셋성분의 온도계수, β 와 γ 는 각각 4개의 압저항의 특성차에 의한 오프셋성분과 잔류응력성분이고, π 는 압력에 관한 계수이다. 또 T 와 P 는 각각 온도와 압력이다.

두 브리지의 오프셋 온도계수를 같게 하기 위해 보상용 브리지성분 식(9)에 보상계수 $\alpha_{det}/\alpha_{com}$ 을 곱하여 식(8)에서 빼면 식(10)과 같이 압력이 제로인 상태에서 잔류응력에 의한 성분만 남게 된다.

$$V_{det} - V_{com}(\alpha_{det} / \alpha_{com}) = \gamma_{det} \quad (10)$$

이 감산에서 식(8)과 (9)의 둘째 항 β_{det} 와 β_{com} 는 거의 같은 값이고, 셋째 항 γ_{com} 은 설계상 "0"이다. 최종적으로 잔류응력에 의한 오프셋성분을 출력해서 신호 처리 회로를 이용하여 감산해주므로 압저항 압력센서의 오프셋 및 그 드리프트를 보상하게 된다.

3. 센서 제작

그림 3는 보상용 브리지를 포함한 실리콘 압력센서를 표준 IC 제조기술을 기초로 마이크로머시닝 기술을 이용하여 제작하는 과정 도이다. 실리콘 기판은 SDB(silicon direct bonding)기술로 제작된 SOI ($n-Si/SiO_2/p-Si$) 웨이퍼를 사용한다. 그 두께는 각각 $20\mu m$, $1\mu m$, 및 $230\mu m$ 이다. 먼저 다이아프램은 $90^\circ C$, 22wt% TMAH(Tetramethylammonium hydroxide; $(CH_3)_4NOH$) 용액에서 실리콘 기판 뒷면을 식각하여 형성된다. 이 TMAH 용액은 알칼리 이온이 들어 있지 않기 때문에 IC 제조 공정에 적합할 뿐 아니라 식각마스크로 SiO_2 막만으로도 충분하다.^[9] SOI 웨이퍼의 SiO_2 막은 다이아프램 두께 편차에 의해 발생하는 오프셋을 줄이기 위해 다이아프램을 식각할 때 식

각정지막(etch-stopper)으로 이용된다.^[10,11] 다이아프램의 크기는 $800\mu m \times 800\mu m \times 20\mu m$ 이다.

다음 그림 3(c)와 같이 다이아프램 뒷면의 SiO_2 막을 제거하여 이온 주입으로 표면 불순물 농도 $5 \times 10^{17} cm^{-3}$ 의 p형 스트레인 게이지를 만든다. 그 후 $0.8\mu m$ 정도의 보호 산화막과 $1\mu m$ 두께의 Al전극을 형성한다. 그림 4은 제작된 압력센서의 사진이다.

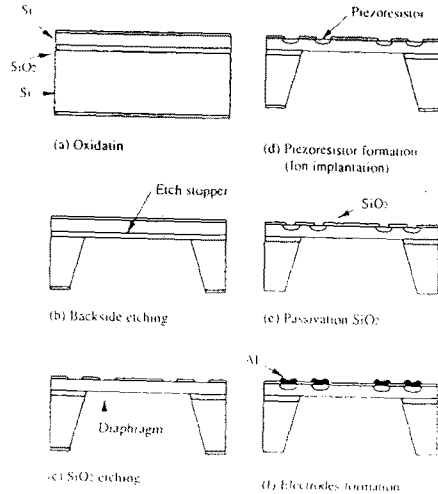


그림 3. 압저항 압력센서의 공정도

Fig. 3. Fabrication process of the piezoresistive pressure sensor

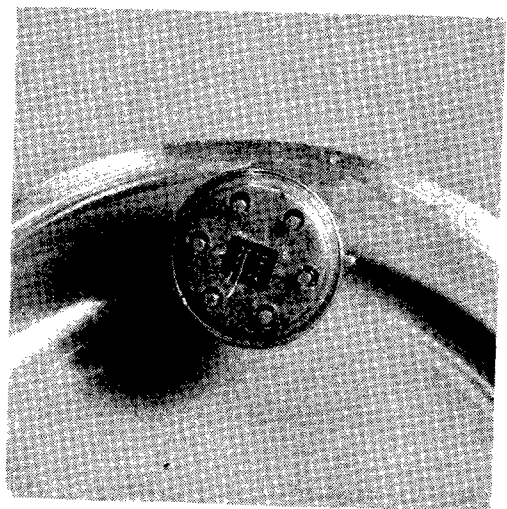


그림 4. 제작된 압력센서의 사진

Fig. 4. Top view photomicrograph of the packaged pressure sensor

4. 측정 및 고찰

그림 5는 잔류응력에 의한 오프셋 영향을 평가하기 위하여 FEM(finite element modeling)을 이용하여 다이아프램의 잔류응력분포를 시뮬레이션한 결과이다. 이것은 실제 압저항이 만들어지는 SiO₂/Si 계면이 아니라 SiO₂ 막의 잔류응력분포이고 그림에서 다이아프램 크기는 FEM 시뮬레이션을 하기 위한 데이터 량을 줄이기 위하여 실제 크기의 1/4로 한 것이다.

그림 6은 잔류응력에 의한 오프셋 및 온도 드리프트를 나타낸 것이다. 오프셋 전압은 온도 상승에 따라 거의

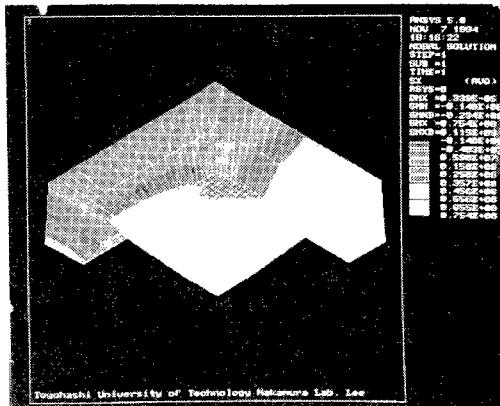


그림 5. 압력센서 다이아프램의 잔류응력분포
Fig. 5. Detailed residual stress distribution in the diaphragm of a pressure sensor

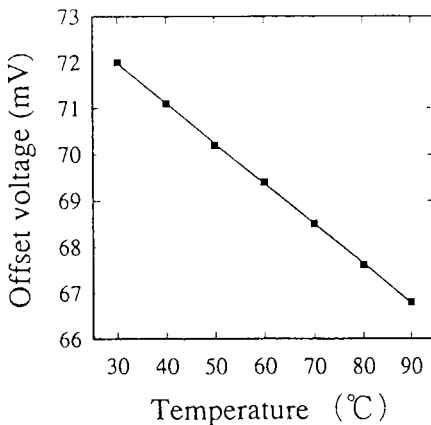


그림 6. 잔류응력에 의한 오프셋의 온도 의존성 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulated results of the temperature dependence of the offset by residual stress

직선적으로 감소하고 있다. 이것은 센서의 실사용온도가 센서 제조온도와와의 차이가 클수록 잔류응력에 의한 오프셋이 큼을 의미한다. 30°C에서 90°C사이에서 오프셋 온도 의존성은 $8.7 \times 10^{-2} \text{ mV/}^\circ\text{C}$ (전원 전압 7 V인 경우)이다.

제작된 압력센서의 압력검출용 브리지와 보상용 브리지에 대하여 온도변화에 따른 오프셋 전압을 측정할 결과를 그림 7에 나타냈다. 압력검출용 브리지(내부 브리지)에는 4개 압저항 특성차에 의한 오프셋 성분과 잔류응력에 의한 성분이 포함되어 있지만, 보상브리지(외부 브리지)에는 압저항들의 특성차에 의한 오프셋 성분만 나타난다. 그림에서 알 수 있듯이 30°C에서 두 브리지의 오프셋은 각각 약 162mV 및 79.9mV(전원 7V 일때)이고, 그들의 온도 드리프트는 각각 약 0.47mV/°C 및 0.7mV/°C 이다. 그림 8은 잔류 응력에 의한 오프셋 성분을 측정할 값과 시뮬레이션한 값을 나타내고 있다. 측정값은 그림(7)의 내부 브리지 출력 값에서 외부 브리지 출력값을 뺀 결과이다. 이 결과에서 두 개의 휘트스톤 브리지를 이용하여 오프셋과 오프셋 온도드리프트를 보상하는 식(6)과 식(7)의 설명이 증명된다. 그림에서 실험 값과 시뮬레이션 값과의 차이는 주로 FEM 시뮬레이션을 하기 위한 센서 모델링의 정확도 오차에 기인한 것이다.

그림 9는 one-chip microcomputer(TSS 400 CFN-SI)

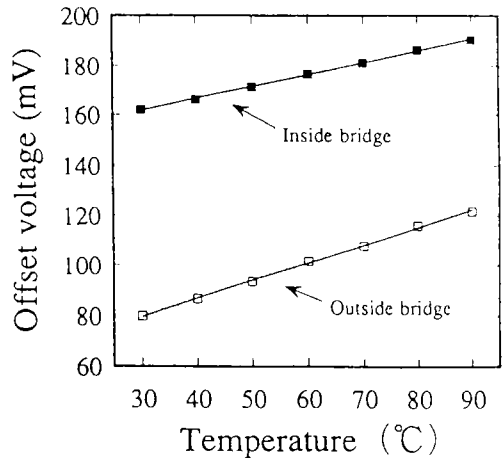


그림 7. 온도변화에 따른 내부 브리지 및 외부 브리지의 오프셋 측정결과
Fig. 7. Experimentally obtained the offset and its temperature dependence of the inside and outside bridges.

를 이용하여 잔류응력에 의한 오프셋 성분을 제거하기 위한 신호 처리 회로 시스템이다.

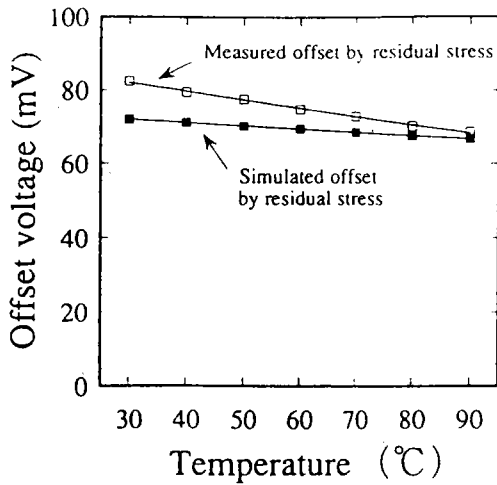


그림 8. 잔류응력에 의한 오프셋의 측정값과 시뮬레이션 값

Fig. 8. Measured and simulated offset by residual stress.

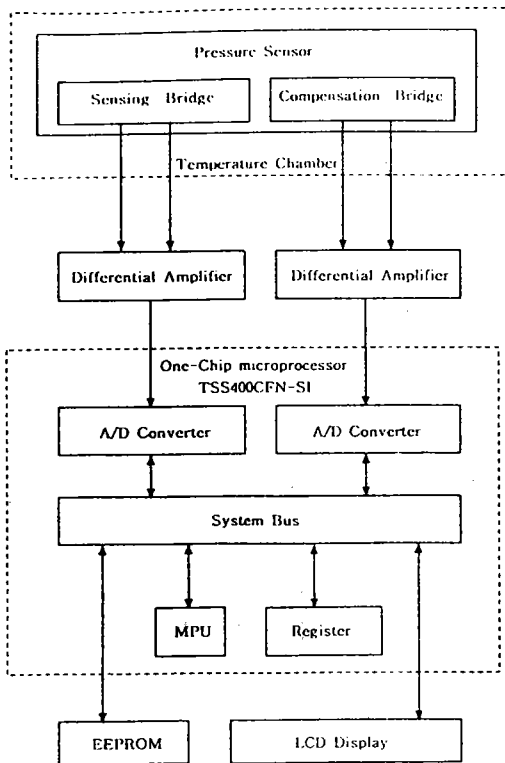


그림 9. 측정 시스템의 블럭도

Fig. 9. Block diagram of measuring system.

그림 10은 제작된 센서에 대하여 오프셋 및 그 온도 드리프트를 보상하기 전의 출력특성이고, 그림 11은 보상후의 출력특성이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 영점 오프셋 값이 5mV 이하이고, 오프셋의 온도 드리프트도 대폭 개선되었다. 두 그림을 비교해보면 영점 오프셋과 그 온도 드리프트가 95%이상 보상되었음을 알 수 있다. 제작된 압력센서의 감도는 30℃, 0.9kgfcm⁻² 최대 압력 범위에서 11.7mV/Vkgfcm⁻² 이었다.

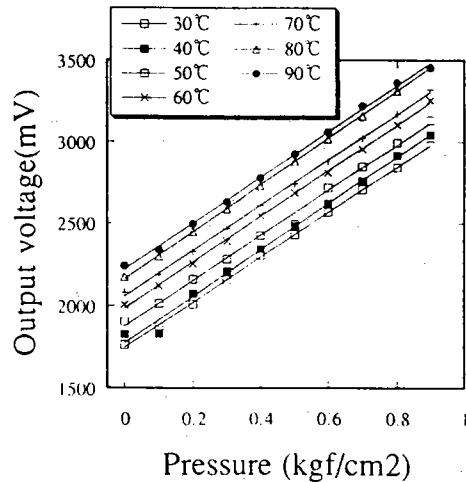


그림 10. 보상하기 전 압력센서의 출력전압

Fig. 10. Output voltages of the pressure sensor before the compensation.

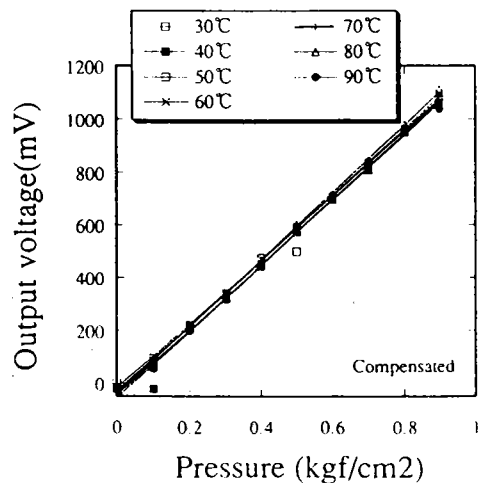


그림 11. 보상된 압력센서의 출력전압

Fig. 11. Output voltages of the compensated pressure sensor.

5. 결론

압저항형 압력센서의 오프셋 및 그 온도 드리프트를 보상하기 위해서 소자 내에 2중 휘트스톤 브리지를 구성하여 그들 출력을 감산하는 보상원리를 제안하고, 보상용 브리지를 포함하는 2중 브리지형 압력센서를 제작하였다.

이 센서의 특징은 보상용 브리지를 정방형 다이아프램 위에 위치하는 압력 검출용 브리지 바로 옆 프레임 위에 배치하고 이 두 브리지에서 나오는 신호를 one-chip microcomputer를 이용하여 연산 처리하여 오프셋과 그 온도 드리프트를 95% 이상 감소한 것이다. 특히, 다이아프램을 형성할 때 SDB 웨이퍼의 SiO_2 막을 식각 정지막(etch-stopper)으로 이용하여 그 두께가 균일하도록 하여 다이아프램의 잔류응력을 줄였다. 제작된 센서의 감도는 $11.7mV/Vkgfcm^{-2}$ 이었다.

감사의 글

본 연구에 있어서 센서 제작을 도와준 일본 토요하시 대학의 전자 디바이스 연구실에 감사를 드린다.

REFERENCE

- [1] C. Smith, "Piezoresistance effect in germanium and silicon", Phys. Review, vol.94, pp.42-49, 1954
- [2] M. Esashi, H. Komatsu, T. Matsuo, M. Takahashi, T. Takishima, K. Imabayashi and H. Ozawa, "Fabrication of catheter-tip and sidewall miniature pressure sensor", IEEE Trans. Electron Device, vol ED-29, pp.57-63, 1982
- [3] S. Kim and K. Wise, "Temperature sensitivity in silicon piezoresistive pressure transducer", IEEE trans, Electron Device, vol. ED-30, pp.802-810, 1983
- [4] H. H. Bau, N. F. deRoos and B. Kloeck, Sensors, vol. 7, VCH, Weinheim, pp.94, 1994
- [5] Y. Kanda, "A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon", IEEE Trans, Electron Device, vol. ED-29, pp.64-70, 1982
- [6] F. M. d'Heurle, "Metallurgical topics in silicon device interconnects : thin film stresses", Inter. Materials Reviews, vol. 34, pp.53-68, 1989
- [7] K. Okada, K. Nuri, S. Yagawara, A. Shiomura, T. Takizawa, H. Kishi and M. Nakamura, "Temperature drift in silicon diaphragm piezoresistive pressure sensors", Technical Report of Tensen, vol. 69, pp.41-57, 1988
- [8] K. Yamada, M. Nishihara, S. Tanabe, M. Shimazae and Y. Matsuoka, "Nonlinearity of the piezoresistance effect of p-type silicon diffused layers". IEEE Trans, Electron Devices, ED-29, pp.71-77, 1982
- [9] O. Tanaba, R. Asashi, H. Funabashi and S. Sugiyama, "Anisotropic silicon etching using $(CH_3)_4NOH$ solution", Proc.6th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators(Transducers'91). San Francisco, CA, USA, June 24-28, pp.811-814, 1991
- [10] M. Ishida, M. Ashiki, K. Sawada, S. Yamaguchi and T. Nakamura, "Epitaxially stacked structure of $Si/Al_2O_3/Si$ for sensor materials", Sensors and Actuators, A21-A23, pp.267-270, 1990
- [11] Y. T. Lee, H. D. Seo, M. Ishida, S. Kawahito and T. Nakamura, "High temperature pressure sensor using double SOI structure with two Al_2O_3 films", Sensors and Actuators, A, 43, pp.59-64, 1994
- [12] O. D. Trapp, R. A. Blanchard, L. J. Lopp and T. I. Kamius, Semiconductor technology hand book, Technology associates

 著 者 紹 介

金 載 文

『센서학회지 제5권 제1호』 논문 96-5-1-07, p.50 참조
 현재 영남대학교 대학원 전자공학과 박사과정

徐 熙 敦

『센서학회지 제1권 제1호』 논문 92-17, p.154 참조
 현재 영남대학교 전기전자공학부 교수

崔 世 崑

『센서학회지 제5권 제1호』 논문 96-5-1-07, p.50 참조
 현재 영남대학교 전기전자공학부 교수

**李 榮 泰**

1961년 12월 29일생, 1989년 영남대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1991년 영남대학교 대학원 전자공학과 전자재료전공 졸업(공학석사). 1995년 일본 토요하시 기술과학대학 시스템정보전공 졸업(박사). 1995년 4월~1996년 2월 일본 동북대학 공학부 기계전자공학과 문부교관 조수. 1996년 3월~현재 안동대학교 사범대학 전자공학교육과 전임교수. 주관심분야 : 마이크로머시닝 및 반도체센서