

논문 96-5-5-04

폴리실리콘의 전단 압저항현상을 이용한 압력센서

박성준*, 박세광**

Pressure sensor using shear piezoresistance of polysilicon films

Sung-June Park* and Se-Kwang Park**

요약

본 연구에서는 LPCVD(저압화학기상증착)로 형성된 폴리실리콘의 전단 압저항 효과를 이론적으로 분석하고, 전단 압저항체를 응용한 압력센서를 설계·제작하여 그 특성을 연구하였다. 제작된 센서는 1kgf/cm^2 의 압력과 $-20\sim+125^\circ\text{C}$ 의 온도범위에서 3.1mV/V 의 압력감도, $\pm 0.012\%FS/^\circ\text{C}$ 의 오프셋온도계수(TCO), $\pm 0.08\%FS/^\circ\text{C}$ 의 감도온도계수(TCS)를 나타내었다. 또한, 같은 온도범위에서 $\pm 0.2\%FS$ 의 히스테리시스, $\pm 1.5\%FS$ 의 비직선성 변화를 보였다. 전단형 압력센서는 브리지형과는 달리 하나의 저항체로 이루어져 있어 브리지의 각 저항값 불일치로 인한 특성의 오차를 줄일 수 있고, 절연층 위에 폴리실리콘이 형성되어 있으므로 온도범위를 확장할 수 있는 장점을 가진다.

Abstract

This paper presents characteristics of pressure sensor using shear-type piezoresistor of LPCVD(low pressure chemical vapour deposition) grown polycrystalline silicon films. The sensor has 3.1mV/V of pressure sensitivity in the pressure range of 1kgf/cm^2 , $\pm 0.012\%FS/^\circ\text{C}$ of TCO, and $\pm 0.08\%FS/^\circ\text{C}$ of TCS in the temperature range of $-20\sim+125^\circ\text{C}$. It showed $\pm 0.2\%FS$ of hysteresis and $\pm 1.5\%FS$ of non-linearity. Shear-type polycrystalline silicon pressure sensor can eliminate temperature dependence of offset caused by resistors mismatch and be used in relatively wide temperature range, compared to the conventional full-bridge silicon pressure sensors.

1. 서론

실리콘을 재료로한 압저항형 압력센서는 단결정실리콘의 압저항 현상을 이용하여 여러 가지 형태의 휘스톤 브리지로 구성된 것이 주류를 이루고 있다. 그리고, 압저항체의 개선된 형태로써, 설계와 제작이 용이하고 박막의 크기를 소형화하기에 유리한 전단 압저항 효과(shear piezoresistive effect)와 이를 이용한 4단자형 압력센서의 연구가 계속 되어왔다^[1,2]. 전단 압저항 효과는 입방 결정체에서 전계의 방향과 전류의 방

* 경북대학교 대학원 전기공학과 박사과정
(Ph. D. Candidate, Department of electrical engineering, Graduate school, Kyungpook National University)

** 경북대학교 공과대학 전기공학과 부교수, 공학박사
(Ph. D., Professor, Department of electrical engineering, Engineering college, Kyungpook National University)

<접수일자 : 1996년 8월 8일>

항이 수직을 이루는 경우 전단응력에 비례하는 전압이 발생되며, 그 전압은 저항체와 응력이 이루는 각도의 함수가 되는 것을 말한다. 또한, 이것은 자계내에서의 홀(Hall) 효과를 이용한 소자와 원리가 같으며, 다만 자계의 세기에 비례하는 전압이 아니라 응력에 비례하는 전압이 발생한다는 점이 다르다. 이 효과는 Pfann과 Thurston이 단결정실리콘의 횡방향과 전단 압저항 효과에 대한 연구를 통해 알려지게 되었다^[1].

압력센서에서 압저항체가 4단자 형태로 형성되면 브리지형과 거의 같은 수준의 압력 감도를 가지면서, 하나의 저항체로 만들어져 있으므로 브리지형에서 나타나는 각 저항체 특성의 불일치로 인한 오차를 없앨 수 있다. 그러나, 단결정실리콘 저항체에 오프셀 전압과 압저항 효과의 온도 의존성은 여전히 존재하므로, 사용온도범위에 제약이 있고 온도보상이 뒤따라야 한다.

이러한 문제를 보완하기 위하여 본 연구에서는 폴리실리콘의 전단 압저항효과를 이론적으로 분석하고, 열확산된 폴리실리콘으로 4단자형의 압저항체를 형성해 압력센서의 특성을 측정하였다.

II. 폴리실리콘의 전단 압저항특성

그림 1과 같이 형성된 4단자 저항체에서, x방향으로 전류밀도 j_x 가 존재하고 각 방향의 응력에 의해 y방향으로 여기되는 전계 E_y 는 종방향 응력 σ'_x , 횡방향 응력 σ'_y , 그리고 전단 응력 τ'_{xy} 에 대해 각각 대응되는 압저항상수의 함수로 식 (1)과 같이 표현된다^[3].

$$\frac{\Delta E_y}{\rho_o j_x} = \pi'_{61} \sigma'_x + \pi'_{62} \sigma'_y + \pi'_{66} \tau'_{xy} \quad (1)$$

여기서, ρ_o 는 저항체의 저항률, π'_{61} , π'_{62} , π'_{66} 는 각 성분응력에 의해 발생하는 전계에 해당되는 압저항 상수를 나타내며, 각각 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \pi'_{61} &= (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 l_2 + m_1^2 m_2 + n_1^2 n_2) \\ \pi'_{62} &= 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1 l_2^2 + m_1 m_2^2 + n_1 n_2^2) \\ \pi'_{66} &= \pi_{44} + 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2) \end{aligned}$$

이고, l_i, m_i, n_i 는 각각 좌표계에서의 방향여현을 나타내며, $\pi_{11}, \pi_{12}, \pi_{44}$ 는 응력을 받지 않았을 경우의 압저항 상수이다.

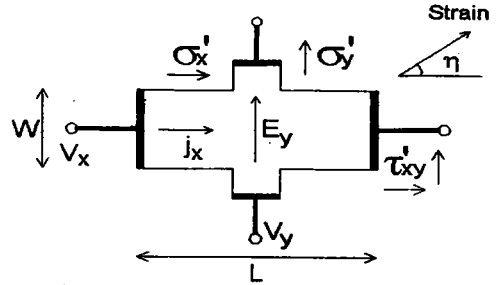


그림 1. 4 단자 저항체와 각 방향의 응력.

Fig. 1. Four-terminal resistor and stresses of each direction.

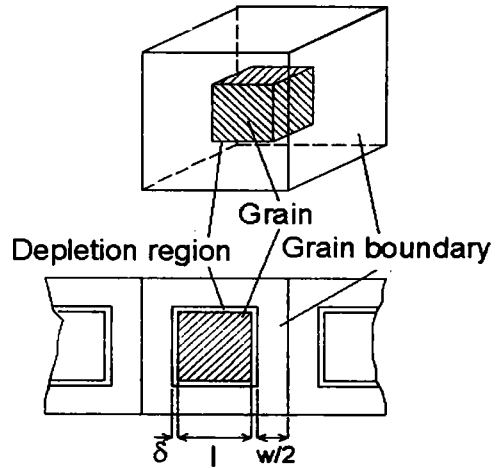


그림 2. 폴리실리콘 결정의 모델.

Fig. 2. Model of polysilicon crystals.

저항체를 폴리실리콘으로 형성할 경우, 폴리실리콘은 구조상 그림 2와 같이 간략화할 수 있으며, 단결정을 이루는 그레인(grain)과, 결정방향이 서로 다르고 인접한 그레인들 사이의 계면 천이영역인 그레인 경계(grain boundary)로 이루어져 있으므로 그 저항률 ρ 는^[4]

$$\rho = \frac{[l - (2w + \delta)]}{l} \rho_g + \frac{(2w + \delta)}{l} \rho_b \quad (2)$$

로 나타내지며, 여기서 ρ_g 는 그레인의 저항률, ρ_b 는 그레인 경계의 저항률, l 은 그레인의 크기, w 는 그레인 경계의 크기, 그리고 δ 는 공핍층의 크기를 각각 나타낸다.

식 (2)에서 폴리실리콘에서 저항율의 변화 $\Delta \rho / \rho$ 를 그레인과 그레인 경계에서 각각 분리해서 고려한다면, 다음의 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\Delta \rho}{\rho \epsilon} = \frac{\{l - (2w + \delta)\}}{l \epsilon \rho} \Delta \rho_g + \frac{(2w + \delta)}{l \epsilon \rho} \Delta \rho_b \quad (3)$$

여기서, $\Delta \rho_g$ 와 $\Delta \rho_b$ 는 각각 그레인과 그레인 경계의 저항변화분이고, ϵ 는 스트레인을 나타낸다. 식 (3)에서 좌변은 게이지율을 나타내므로, 폴리실리콘의 응력에 평행한 스트레인에 대한 compliance 계수 S'_{ii} 를 이용하여 다시 다음 식 (4)와 같이 표현될 수 있다^[5].

$$\frac{\pi_1}{S'_{ii}} = \frac{\Delta \rho}{\rho \epsilon} = \frac{1}{S'_{ii}} \left[\frac{\rho_g \pi_{1g}}{\rho_g + \frac{(2w + \delta)}{\{l - (2w + \delta)\}} \rho_b} + \frac{\rho_b \pi_{1b}}{\frac{\{l - (2w + \delta)\}}{(2w + \delta)} \rho_g + \rho_b} \right] \quad (4)$$

여기서,

$$S'_{ii} = S_{11} + (S_{44} + 2S_{12} - 2S_{44})(l_i^2 m_i^2 + l_i^2 n_i^2 + m_i^2 n_i^2)$$

π_{1g} : 폴리실리콘의 종방향 압저항 계수

π_{1b} : 폴리실리콘 그레인의 종방향 압저항 계수

π_{1b} : 폴리실리콘 그레인 경계의 종방향 압저항 계수

이고, S_{11} , S_{12} , S_{44} 는 compliance 계수이다. 식 (4)는 각 그레인에서의 압저항상수가 되며, 폴리실리콘 각 그레인의 게이지율은 식 (4)를 포함하는 식 (5)로 나타낼 수 있다^[5].

$$S = 1 - \sum_j \frac{S'_{ij}}{S'_{ii}} (1 - \delta_{ij}) + \frac{1}{S'_{ii}} \left[\frac{\rho_g \pi_{1g}}{\rho_g + \frac{(2w + \delta)}{\{l - (2w + \delta)\}} \rho_b} + \frac{\rho_b \pi_{1b}}{\frac{\{l - (2w + \delta)\}}{(2w + \delta)} \rho_g + \rho_b} \right] \quad (5)$$

여기서,

$$S'_{ii} = S_{12} + (S_{11} - S_{12} - \frac{1}{2} S_{44})(l_i^2 l_j^2 + m_i^2 m_j^2 + n_i^2 n_j^2)$$

이다. 위 식 (5)로부터 그레인을 포함하는 폴리실리콘 저항체에 대한 게이지율은 폴리실리콘을 형성하는 각 그레인의 방향성이 고려되어야 한다. 즉, 방향을 달리 하는 단결정의 그레인이 모여서 이루어지는 폴리실리

콘은 그 결정방향의 분석을 통해서 이루어진다. 그러므로, 인가된 전원 V_x 와 응력 ϵ 에 대한 4단자형 폴리실리콘 저항체에서의 출력전압 ΔV_y 는 다음의 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다^[3].

$$\frac{\Delta V_y}{V_x \epsilon} = \frac{W}{L} \frac{\{l - (2w + \delta)\}}{l} \left(\frac{\pi'_{61} \cos^2 \eta}{S'_{ii}} + \frac{\pi'_{62} \sin^2 \eta}{S'_{ii}} + \frac{\pi'_{66} \sin 2\eta}{2S'_{ii}} \right) \quad (6)$$

여기서, L과 W는 그림 1에서의 4단자 저항의 크기를 나타낸다. 식 (6)에서 π'_{66} 가 π'_{61} 와 π'_{62} 보다 큰 값을 가지므로, 응력과 저항체가 이루는 각도인 η 가 45°일 경우에 최대의 출력을 가지게 된다.

III. 센서의 설계와 제작

제작된 센서의 형태는 습식식각의 공정과 폴리실리콘 압저항체 게이지율의 이방적 특성을 고려하여 그림 3과 같이 직사각형으로 설계하였다. 박막의 가로세로 비(aspect ratio, b/a)를 결정하기 위하여 FEM(finite element method) 프로그램을 이용하여 그림 4와 같은 결과를 얻었다. 즉, b/a를 1.67에서 3까지의 변화시킬 경우, 긴 변의 가장자리와 박막중앙의 응력이 b/a의 값 2에서 거의 일정하게 되고 3에서는 최대값을 가진다. 그러므로, 센서의 크기를 고려하여 가로와 세로의 길이를 1500×3000 μ m로 설계하였다.

또한, 센서의 압력감도는 폴리실리콘 압저항체가 놓이는 실리콘 박막의 응력분포에 의해 영향을 받으므로 직사각형 박막의 성분별 응력을 계산하여 분포를 해석하였다. 실리콘 박막 구조에서 박막중앙을 원점으로 하는 좌표를 만들고 X, Y방향으로 각각의 응력분포는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다^[6].

$$\sigma_x = \frac{-Eh}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 D}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 D}{\partial y^2} \right)$$

$$\sigma_y = \frac{-Eh}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 D}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \right) \quad (7)$$

여기서, E는 실리콘의 영률(Young's modulus), ν 는 포아송비(Poisson's ratio), h는 실리콘 박막의 두께, 그리고 D는 박막의 휨(deflection)을 각각 나타낸다.

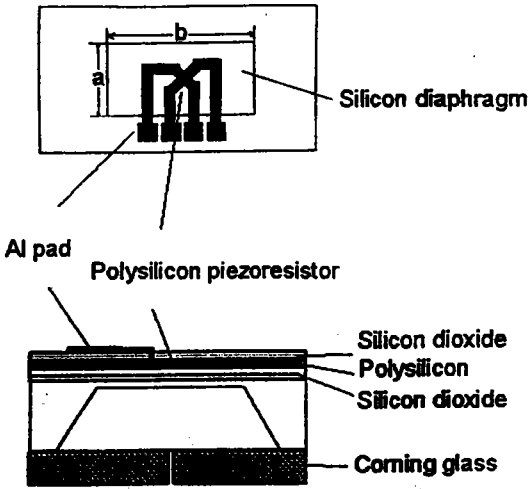


그림 3. 압력센서의 단면과 평면구조.

Fig. 3. Cross section and top view of pressure sensor.

설계된 실리콘 박막의 응력분포를 계산하여 곡선으로 나타내면 그림 5와 같이 직사각형의 중앙과 가장자리에서 $|\sigma_x - \sigma_y|$ 의 값이 최대가 되므로, 제작의 용이성과 특성의 직선성을 고려하여 중앙부분에 저항체를 설계하였다.

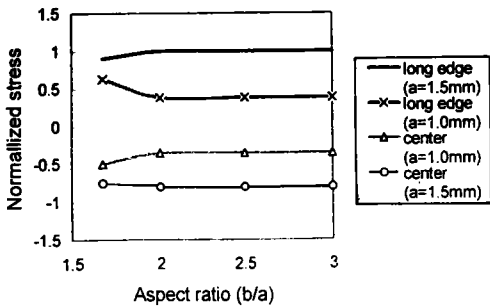


그림 4. 직사각형 박막의 가로세로비에 대한 박막상의 응력

Fig. 4. Normalized stress on the diaphragm according to aspect ratio of rectangular diaphragm.

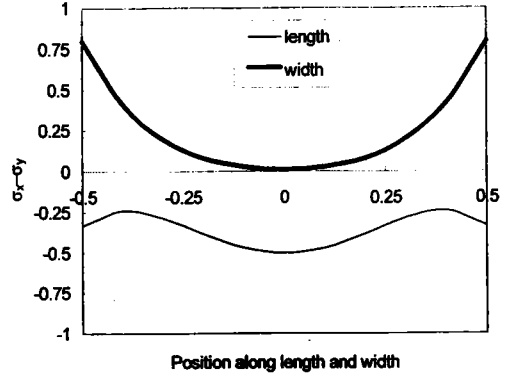


그림 5. 박막의 길이와 폭방향에 있어서의 $\sigma_x - \sigma_y$.
Fig. 5. $\sigma_x - \sigma_y$ along the length and width of diaphragm.

전단형 압력센서의 제작은 집적회로 형성에 사용되는 반도체 공정과 식각, 양극접합의 미세가공기술을 이용하였다. N형 $300\mu\text{m}$ 두께의 실리콘 기판위에 열산화막을 $1.2\mu\text{m}$ 형성하고, 그 위에 LPCVD로 폴리실리콘 박막을 5000\AA 의 두께로 성장시킨다. LPCVD는 SiH_4 개스만을 이용하며, 유량은 60SCCM 으로 625°C , 0.5Torr 의 조건에서 성장율은 약 $80\text{\AA}/\text{min}$ 로 측정되었다. 폴리실리콘 위에 패턴의 형성을 위하여 다시 습식산화로 약 2000\AA 두께의 산화막을 만들고, 압저항체의 신호를 인출하기 위한 전극선을 제작한다. 압저항체는 붕소의 1000°C 에서의 열확산으로 형성한 후 콘택트 홀을 열고, 알루미늄을 증착하여 저항체를 연결하였다. 붕소가 확산된 폴리실리콘의 불순물 농도는 약 $2.0 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 로 측정되었다.

실리콘 박막은 TMAH(tetra methyl ammonium hydroxide) 22wt%의 용액으로 90°C 에서 식각하며, 박막의 두께를 정밀하게 조절하기 위해 용액내에 담구어 사용할 수 있는 지그를 이용하였다. 박막이 형성된 센서는 Corning #7740 유리와 400°C 에서 정전력을 이용하여 접합시키는데, 유리가 음극이 되며 실리콘 쪽의 식각된 패턴이 보일 수 있도록 침전극을 이용한다. 그림 6은 제작된 센서의 패턴사진을 나타낸다. 접합된 센서는 금속 캔에 패키징하여 센서의 금속패드 부분과 캔의 핀을 와이어 본딩하여 출력신호를 외부로 인출한다.

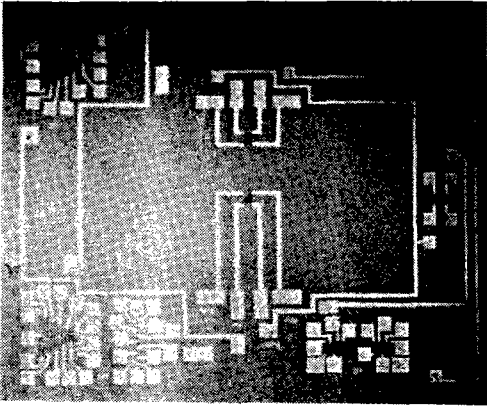


그림 6. 제작된 센서의 패턴사진 (4mm×5mm).
 Fig. 6. Photograph of fabricated sensor pattern (4mm×5mm).

IV. 센서특성의 측정

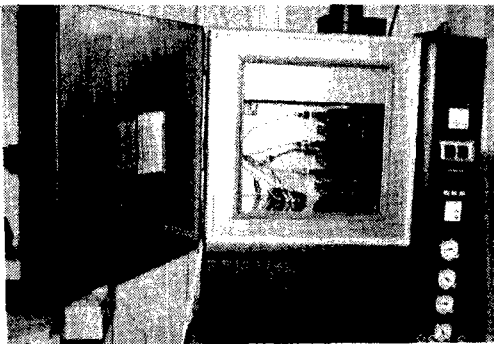


그림 7. 센서 특성시험 시스템의 사진.
 Fig. 7. Photograph of test system.

제작된 센서는 압력과 온도에 대한 특성을 측정하기 위해 질소를 압력원으로 하였고, 기준 압력계는 DH INSTRUMENT사의 모델 PPC2로 정밀도가 0.05%인 압력검교정기를 이용하였다. 또한, 설정된 온도를 정밀하게 유지하기 위해 THERMOTRON사의 모델 S-1.2C로 온도범위가 -73~+177℃ 이고, 온도 오차 범위가 ±0.3℃인 오븐을 이용하였다. 그리고, 전원장치로는 HEWLETT PACKARD사의 6543A를 사용하여 5VDC를 센서에 인가하였다. 그림 7은 압력센서의 측정장치 시스템의 사진이다. 측정압력은 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0kgf/cm²의 6점을, 그리고 측정온도는 -20, +25, +80, +125℃의 4점을 정하여 센서의 출력을 전압값으로 측정하였다.

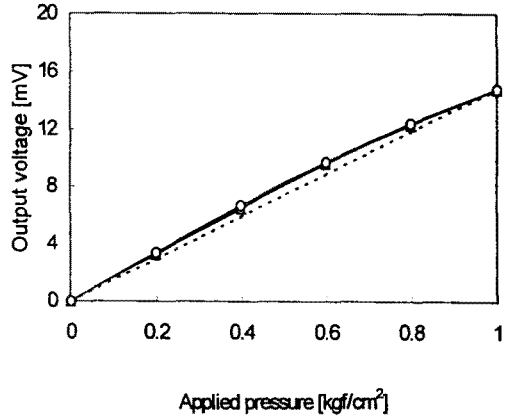


그림 8. 압력감도 특성.
 Fig. 8. Characteristics of pressure sensitivity.

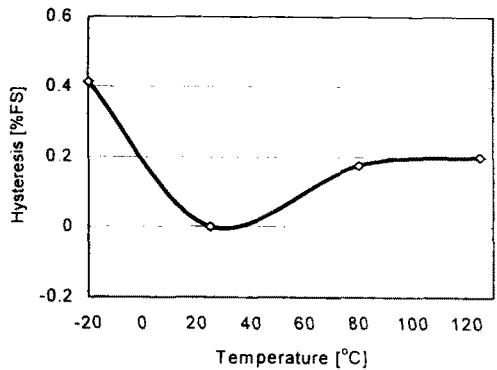


그림 9. 온도변화에 따른 압력측정의 히스테리시스.
 Fig. 9. Hysteresis of sensor output according to temperature.

상온에서 0.0~1.0kgf/cm²의 압력범위에 대한 출력 전압의 변화는 그림 8과 같다. 출력특성곡선에서 압력 감도는 3.1mV/V이며, 비직선성이 약 ±1.5%FS/℃의 값을 가진다. 그림 9와 10은 각각 상온에서의 값을 기준으로 히스테리시스와 비직선성의 온도에 대한 변화를 나타낸다. 온도가 증가 또는 감소함에 따라 압력에 대한 출력전압의 히스테리시스는 커지는 추이를 보이며, 비직선성은 온도가 증가함에 따라 감소하는 특성을 보인다. 그리고, 그림 11에서와 같이 오프셀의 온도계수는 ±0.012%FS/℃, 감도의 온도계수는 ±0.08%FS/℃

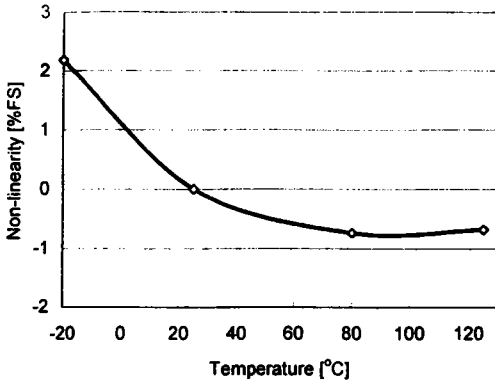


그림 10. 센서출력의 온도에 따른 비직선성 변화.

Fig. 10. Non-linearity change of sensor output according to temperature.

의 값을 각각 나타낸다. 이 값은 단결정실리콘을 재질로 하여 같은 형태로 제작된 센서보다 훨씬 우수한 온도특성을 나타낸다.

V. 결론

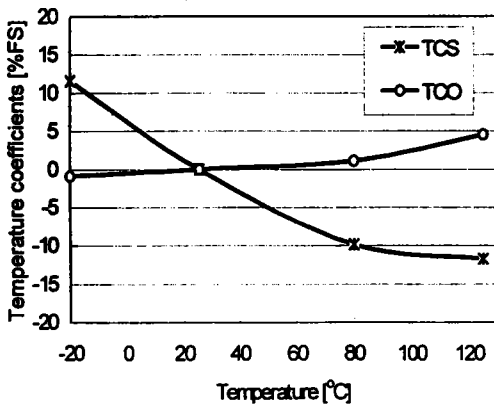


그림 11. 압력센서의 TCS와 TCO 특성.

Fig. 11. TCS and TCO characteristics of the pressure sensor.

폴리실리콘 저항체가 가지는 온도특성과 전단형 압저항체의 구조적 장점을 결합한 압력센서의 특성을 연구하였다. 제작된 전단형 압력센서는 같은 조건의 브리지형에 비해 1/3정도로 감도가 낮지만, 브리지형의 저항특성 불일치에 의한 결점을 없앨 수 있으므로 더

넓은 온도범위에서 안정적으로 사용될 수 있다.

특성시험결과 $-20 \sim +125^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위에서 TCO와 TCS가 각각 $\pm 0.012\% \text{FS}/^{\circ}\text{C}$ 와 $\pm 0.08\% \text{FS}/^{\circ}\text{C}$ 로 나타나 오프셀전압과 감도의 온도의존성이 아주 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 MOTOROLA에서 제작된 온도보상 압력센서의 감도온도계수가 $\pm 0.02 \sim \pm 0.5\% \text{FS}/^{\circ}\text{C}$ 인 값과 비교해 볼때, 고온에서 온도보상없이 적용이 가능함을 나타낸다. 즉, 본 논문에서 연구된 폴리실리콘 전단형 압력센서는 기본적인 압력측정 특성을 가지면서, 온도특성이 우수하여 기존 반도체 압력센서의 문제점인 온도의존성과 사용온도범위의 제한등을 보완할 수 있다.

참고문헌

- [1] W. G. Pfann and R. N. Thurston, "Semiconducting stress transducers utilizing the transverse and shear piezoresistance," J. Appl. Phys., vol. 32, pp. 2008-2109, 1961.
- [2] Y. Kanda and A. Yasukawa, "Hall-effect devices as strain and pressure sensors," Sensors and Actuators, vol. 2, no. 3, pp. 283-296, 1982.
- [3] P. J. French and A. G. R. Evans, "Polysilicon strain sensors using shear piezoresistance," TRANSDUCERS '87, pp. 379-382, 1987.
- [4] N. C. C. Lu, L. Gertzberg, C. Y. Lu, and J. D. Meindl, "Modeling and optimization of monolithic polycrystalline silicon resistors," IEEE Trans. Electron Devices, ED-28, pp.818-830, 1985.
- [5] P. J. French and A. G. R. Evans, "Polycrystalline silicon strain sensors," Sensors and Actuators, vol. 8, pp. 219-225, 1985.
- [6] Xian-ping Wu, Mei-feng Hu, Jia-ying Shen and Qing-hua Ma, "A miniature piezoresistive catheter pressure sensor," Sensors and Actuators A, Vol. 35, pp. 197-201, 1993.

著 者 紹 介



박 성 준

1968년 1월 19일생, 1990년 경북
대 공대 전기공학과 졸업(학사),
1992년 동대학원 전기공학과 졸업
(공학석사), 1995년 동대학원 전기
공학과 박사과정 수료, 1992~현

재 대성전기(주) 기술연구소 주임 연구원, 주관심분야:
반도체 압력센서, 마이크로머시닝 기술

박 세 광

『센서학회지 제1권 제1호』 논문 92-04, p. 10참조.

현재 경북대학교 전기공학부 부교수