논문 2002-11-3-03

스테인레스 봉입형 반도체 압력센서의 제작 및 그 특성

김우정*, 조용수*, 황정훈**, 최시영***

Construction and Characterization of the Stainless Steel Isolated Type Semiconductor Pressure Sensor

Woo-Jeong Kim*, Yong-Soo Cho*,

Jung-Hoon Hwang**and Sie-Young Choi***

요 약

스테인레스 봉입형 압력센서를 제작하기 위하여 먼저 반도체 제조 및 식각 공정을 통하여 반도체 압력센서를 제작하였다. 그리고 이를 glass molding된 스테인레스 housing에 올려놓고 50 ㎛ 두께의 스테인레스 박판을 용접한 후 실리콘 오일을 채워 넣고 봉입하여 압력 범위 10 bar 센서를 완성하였다. 이와 같이 제작한 센서와 XTR105 발신기 전용 회로를 결합하여 4~20 mA 출력의 압력 발신기를 제작하고 그 특성을 조사하였다. 온도 보상 전 정확도는 ±5% FS이었으나 보상 후 정확도 ±1% FS로 개선되었다.

Abstract

The silicon piezoresistive pressure sensor is made by semiconductor process to obtain stainless steel isolated type pressure sensor. The sensor is loaded on a stainless steel housing with glass molding, 50 ㎛ stainless steel thin film is welded, and the stainless steel housing encapsulated by silicone oil. The performance of fabricated the pressure sensor has 10 bar pressure range. The XTR105 of exclusive transmitter chip is used the pressure transmitter that output current is 4 - 20 mA. The accuracy is ±5% FS, however, the accuracy is ±1% FS when the sensor is compensated temperature.

Ⅰ. 서 론

압력센서는 외부에서 가해지는 압력의 변화를 감지하여 이를 전기적인 신호로 변환시키는 장치로서 압력 측정이 요구되는 산업용 로보트를 비롯하여 자동차, 생체공학용 의료기, 항공, 환경제어 및 산업체의 대규모 시스템 제어 등에 광범위하게 응용되고 있다.[1~3]

* 주식회사 맨텍 (MENTech. Co., Ltd.)
** 대구도시가스 주식회사 (Taegu City Gas Co., Ltd.)
*** 경북대학교 전자전기공학부 (School of Electronic & Electrical Eng., Kyungpook National University)
<접수일자 : 2002년 2월 8일>

반도체 압력센서의 재료로는 게이지 팩터가 크고 히스테리시스가 적으며 집적회로 제조 공정을 적용 할 수 있는 단결정 실리콘이 널리 활용되고 있다. 압력센서 가운데 실리콘 다이아프램형 압력센서는 외부압력에 의해 휨 정도가 달라짐을 이용하는 정전 용량형과 그 위에 위치한 저항체가 응력에 따라 저항값이 바뀌게 됨을 이용하는 압저항형으로 구분된다. 용량형 압력센서는 낮은 온도 의존성을 가지지만 선형성이 매우 나쁘고 출력 신호로 정전용량을 이용하기 때문에 신호처리에 어려움이 많다. 반면에 압저항형 압력센서는 용량형 압력센서 보다 선형성이 우수하고 출력 신호처리가 매우 용이하여 널리 사용되고 있다.

이러한 압저항형 압력센서는 일반적으로 4개의 압저항을 휘트스톤 브릿지(Wheatstone

bridge)로 구성해서 압력에 의한 응력에 비례하는 압저항의 저항변화를 검출한다. 그러나 휘트스톤 브리지를 이용하는 압력센서에는 여러 가지 원인 즉, 센서를 구성하는 재료들의 열팽창 계수차나 불순물의 도핑 농도의 불균일 등에 의해 발생하는 4개 저항의 특성 차이 때문에 오프셋(offset)이 발생하며 그 오프셋이 온도 의존성을 갖고 있고 압저항 및 압저항 계수가 온도 의존성을 갖는 것이 문제가 되고 있다.[4] 특히 확산이나 이온 주입법에 의해 만들어진 압저항체는 높은 온도 의존성을 가져 정밀성 및 신뢰성이 높은 압력센서를 얻는데 문제가 되고 있다.[5]

이와 같은 문제를 해결하기 위해 압력센서의 온도를 보상해야 하는데, 이에는 센서 자체에서 보상을 하는 수동적인 방법, 신호처리로 보상을 하는 능동적인 방법, 시스템에 마이크로프로세서가 사용될 때의 소프트웨어적인 보상법 등이 사용되고 있다.[6~7] 또한 최근에는 압력센서의 용도가 확대됨에 따라 단순한 공기압 뿐만 아니라 유압의 측정, 특히 화학약품이나 부식성 기체 또는 액체 등에 대한 압력측정의 필요성이 요구되고 있다. 그러나 반도체 압력센서의 cell에 직접 이와 같은 압력 매체를 접촉 할 경우 표면의 손상 및 와이어의 단락 등이 일어나 사용할 수 없으므로 이런 용도에 사용할 수 있는 압력센서의 개발이 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 열악한 환경에서도 측정할 수 있는 압력센서를 만들기 위하여 cell이 직접 압력 매체와 접하지 않는 스테인레스(stainless steel) 봉입형으로 제작하고 그 특성을 조사하였다.

II. 실험 및 측정

1. 압력센서의 설계

그림 1.은 제조한 실리콘 압저항형 절대압 센서의 레이아웃과 브릿지회로를 나타낸 것이다. 본 연구에서 실리콘 압저항형 압력센서를 제조하기 위하여 다이아프램의 가장자리에 4개의 압저항체를 브릿지 구조로 형성하였다.

센서의 크기는 2×2 mm^2이고, 다이아프램의 크기는 1.0×1.0 mm^2, 두께는 15 ㎛이다. 다이아프램의 식각 창의 크기는 식각 결과 형성되는 다이아프램의 변이 압력 검출용 압저항체의 끝부분과 일치하도록 하여 최대의 응력이 압저항체에 가해져 센서의 감도가 최대가 될 수 있게 설계하였다. 이때 각 압저항체의 폭은 10 ㎛이고, 압저항체의 길이는 250 ㎛로 설계하여, 압저항체가 각각 3.3 kΩ의 저항이 되도록 하였다.[8]

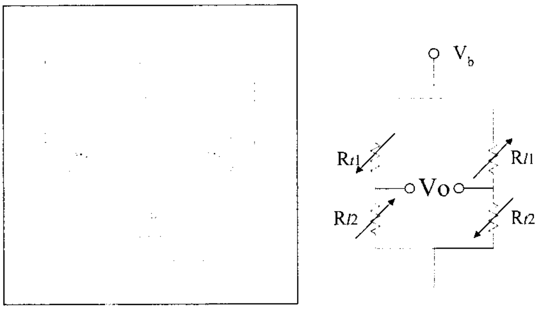

그림 1. 실리콘 압저항형 절대압 센서의 레이아웃과 브릿지 회로.
Fig. 1. Layout of pressure Si resistive absolute pressure sensor and bridge circuit.

실리콘 압저항형 절대압 센서 제조에 사용된 마스크는 총 4장으로, 저항 형성용 마스크, 접촉창(contact open) 형성용 마스크, 금속 전극 형성용 마스크, 그리고 다이아프램 형성을 위한 뒷면 실리콘 식각용 마스크로 구성된다.

2. 실리콘 압저항형 절대압센서의 제조

사용된 웨이퍼는 결정방향이 〈100〉이고 Si(15um)/SiO_2(1um)/Si(450um)구조의 양면경면 처리된 4인치 SDB(silicon direct bonding wafer)를 습식 열산화로 3500 Å의 산화(SiO_2)막을 형성하고, 그 위에 LPCVD(low pressure chemical vapor deposition)법으로 양면을 1500 Å의 질화(Si_3N_4)막을 형성하여 사용하였다. 그림 2는 제조공정 순서를 압력센서의 단면으로 나타낸 것이다. 준비된 기판 위에 양면 마스크 정렬기(aligner)를 이용하여 앞면의 저항체 및 뒷면의 다이아프램 패턴을 사진식각법(photolithography)으로 형성하였다. 양면의 질화막은 건식식각(plasma etching)법을 이용하여 식각한 후 BHF(buffered HF)를 이용하여 양면의 실리콘 산화막을 식각한다. 앞면에 저항이 형성될 부분의 실리콘 산화막을 제거하고, 이온 주입기를 이용하여 붕소 원자를 dose양 $3\times10^{15}/cm^2$, 70 keV의 가속 에너지로 이온 주입을 하였다. 그 후 1000 ℃에서 1시간 동안 wet O_2 분위기에서 어닐링하여 주입된 이온들을 활성시켰다. 이때 형성된 압저

항체의 면저항은 대략 136 Ω/□이다. 저항 형성이 끝난 후, 다이아프램을 형성하기 위한 뒷면 450 μm 실리콘 에칭시 앞면을 보호하기 위하여 1500 Å 두께의 Si_3N_4를 앞면에 LPCVD법으로 증착시킨 후, KOH 수용액으로 83 ℃에서 이방성 식각을 약 5시간 행하였다. 이때 식각율은 1.55 ㎛/min이었다. SDB 웨이퍼 중앙의 1 μm 산화막이 식각 중지층(etch-stop)으로 사용되어 다이아프램 두께의 정확한 조절이 가능하였다[8].

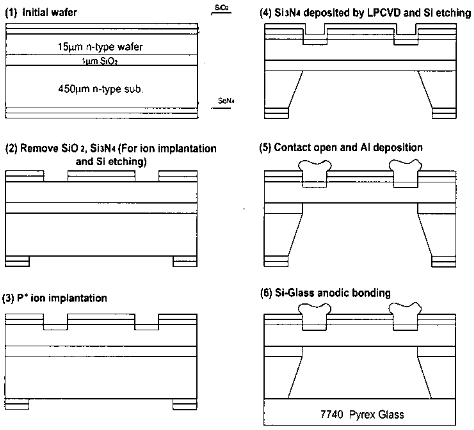

그림 2. 센서 제조 공정 순서도.

Fig. 2. Fabrication process flow of the sensor.

뒷면의 실리콘 식각으로 다이아프램이 형성된 후에는 다이아프램 아래의 산화막과 웨이퍼 뒷면의 질화막과 산화막을 모두 제거하였다. 그 후 사진식각법을 이용하여 전극 접촉부의 실리콘 산화막을 제거하고 알루미늄 박막을 진공 증착하여 전극을 형성하였다. 마지막으로 다이아프램 내의 공극을 진공으로 하기 위하여 유리(Pyrex7740)와 실리콘을 진공중(10^{-3} torr)에서 양극 접합(anodic bonding)을 행하였다.

3. 압력센서의 조립

제작된 압력센서를 단위 cell로 sawing machine으로 절단한 후, 그림 3에서 보는 바와 같은 구조로 조립을 하였다. 압력 매체에 의한 압력센서 cell의 손상을 방지하기 위하여 압력 매체와 압력센서 cell사이에 스테인레스 박판(0.05mm)을 두었다.

외형 구조에 맞도록 설계된 body 상부에 접착제로 cell을 접착한 후 외부 pin과 cell의 금속 pad를 wire bonding한다. 그리고, 주름이 잡힌 박판을 프라즈마 용접한다. 이때 용접시 발생되는 열에 의한 cell의 손상을 최소화하기 위하여 용접기의 온도 및 용접 시간을 조절하였다.

용접된 구조물 뒷면으로 실리콘 오일을 채워놓고, 내부의 기포를 제거하기 위하여 1 torr 이하의 진공 용기 내에 수분 정도 넣어 둔다. 그리고, 오일이 새어나오지 않도록 오일 투입구를 완전히 밀봉하여 조립을 완성한다.

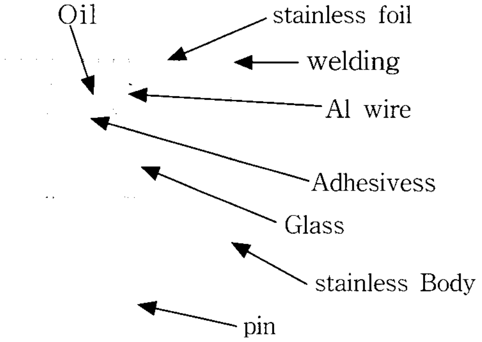

그림 3. 스테인레스 다이어프렘 봉입형 압력센서의 구조.

Fig. 3. Structure of stainless steel diaphragm isolated type pressure sensor.

4. 압력발신기 회로

반도체형 압력센서의 브릿지 회로 출력은 입력 전압에 비례하여 브릿지 양단의 전압차로 나타나게 된다.

본 연구에서는 압력 발신기를 제작하기 위하여서는 차동전압을 4~20 mA의 2선 출력으로 나타나도록 회로를 구성하여야 한다. 그림 4에서 보는 바와 같이 XTR105라는 전용 chip을 이용하였다. 기본적으로 XTR105는 센서의 차동 전압에 비례하여 4~20 mA라는 전류가 출력되도록 하는 기능을 가지는 chip이다. 이러한 chip의 출력은 다음 식과 같은 특성을 가진다.

$$I_o = 4mA + V_{in} \times \left(\frac{40}{R_g}\right)$$

여기에서 R_g는 회로에서 R2, R3, R4, VR1의 합산 저항에 해당하여 gain을 조정하도록 하였다. V_{in}은 sensor pin2와 pin3에서 출력되는 차동 전압에 해당한다. 브릿지형 반도체 압력 센서에서는 온도에 대한 보정이 필요하다. 이 회로에서는 offset을 보정하기 위한 저항 R5~R10

중에서 R6을 온도 감지 저항으로 사용하고 R7을 이용하여 그 기울기를 조정하도록 하였다. 또한, 감도의 온도 특성을 보정하기 위하여 R2에 온도 감지 저항을 두고, 그 기울기를 R3로 조정하도록 하였다.

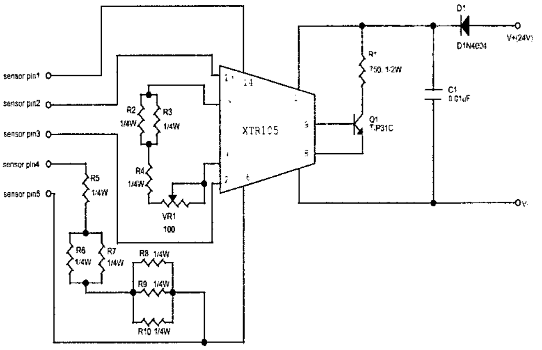

그림 4. 압력 발신기의 주변 회로.

Fig. 4. Pressure transmitter circuit.

5. 압력 센서의 특성 측정

그림 5는 제조된 압력센서의 압력 및 온도 특성을 조사하기 위한 측정 장치의 개략도이다. 압력 특성을 조사하기 위해 질소 가스를 이용하여 압력을 증가시켜 대기압 이상 0~10 bar의 범위에서 측정을 하였다. 또한 온도를 일정하게 유지할 수 있는 항온조를 이용하여 상온에서 70 ℃까지의 온도 특성을 조사하였다.

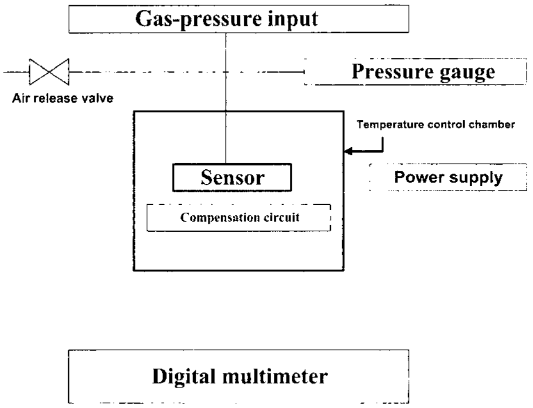

그림 5. 압력센서의 압력 및 온도 특성 측정 시스템의 개략도.

Fig. 5. Schematic diagram to measure the pressure and temperature characteristic of the pressure sensor.

본 연구에서 제작한 압력 발신기는 반도체 압력 센서 cell의 온도 특성을 보정하기 위해 외부의 온도 저항을 사용하기 때문에 cell의 온도에 따른 변화와 보상용 온도 저항의 온도에 따른 변화가 시간적으로 동일한 변화율로 변화하지 않으므로 주변의 급격한 온도 변화는 최종 출력 특성에서 정확한 보상이 일어나지 않으므로 항상 test시에는 온도 변화후 20~30분 정도 뒤에 특성을 조사하였다.

III. 결과 및 고찰

그림 6은 제작된 압력센서 cell을 단위 소자별로 절단하여 TO5위에 접착한 후 wire bonding한 것이며, 그림 7은 이러한 소자를 봉입형으로 제작한 sample의 사진이다. 그리고, 그림 8은 이와 같은 봉입형 압력센서를 압력 발신기에 맞도록 주변 회로를 연결하고 housing에 장착한 사진이다.

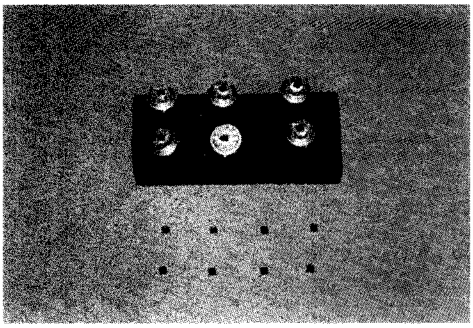

그림 6. TO5 package에 올려진 소자의 사진.

Fig. 6. Photograph of pressure sensor die mounted on TO5 package.

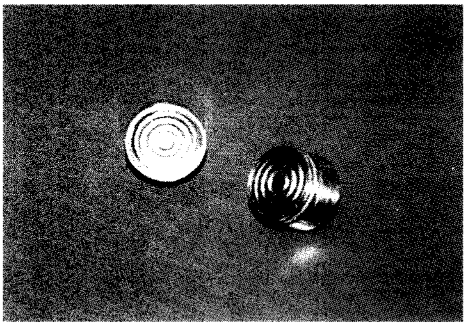

그림 7. 스테인레스 봉입형 압력센서의 사진.

Fig. 7. Photograph of stainless steel isolated type pressure sensor.

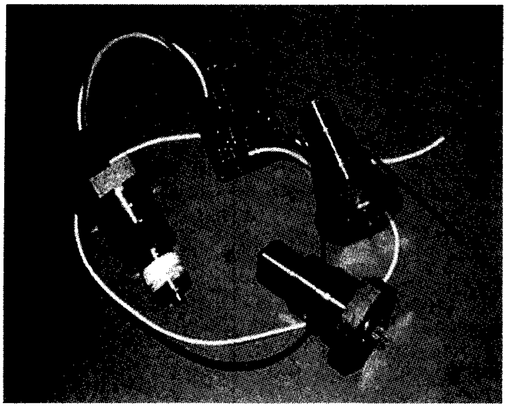

그림 8. 주변회로 및 housing에 장착된 압력센서.
Fig. 8. Assembly circuit and pressure sensor packaged in housing.

제작된 스테인레스 봉입형 반도체 압력센서에 있는 4개의 저항이 압력에 대해 변화하는 저항값을 각각 측정하여 보았다. 그림 9는 제작된 반도체 압력센서 cell에서 대표적인 소자 하나에 대한 특성을 나타내고 있다. 압력센서에 인가되는 게이지압을 변화시켰을 때 다이아프램의 변에 수직한 저항체 R_{l1}, R_{l2}와 평행한 저항체 R_{t1}, R_{t2}에 대한 저항 변화율을 나타낸 것으로 대기압에서 이미 1기압 정도의 압력을 받고 있음을 알 수 있고, 1 V 인가 전압에 대해서, 측정 압력 범위에서 각각의 브릿지 저항들이 모두 ±20 Ω/bar 정도로 변화하고, 선형성은 약 0.3% FS(fulll scale) 범위 내에 있음을 알 수 있다.

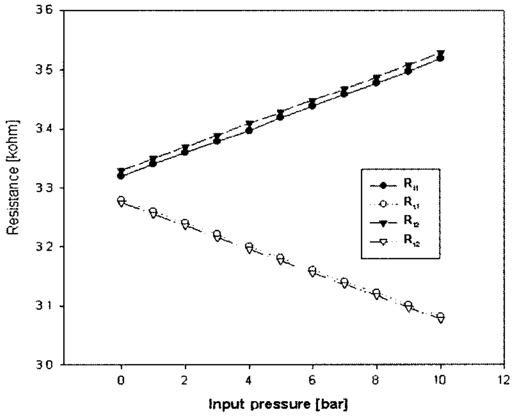

그림 9. 압력에 따른 브릿지 저항의 변화.
Fig. 9. Bridge resistance variation versus pressure.

그림 10은 온도에 따른 offset전압의 변화를 나타내고 있다. 이론적으로는 브릿지형 압력센서인 경우 온도에 대해서 서로 마주보는 저항끼리 그 변화가 상쇄되어야 하지만 실질적으로는 각 저항체 온도 특성의 불균형과 절대압 센서인 경우 이미 1기압의 압력을 받고 있으므로, 감도의 온도 특성에 의해 그림과 같은 특성이 나타나게 된다.

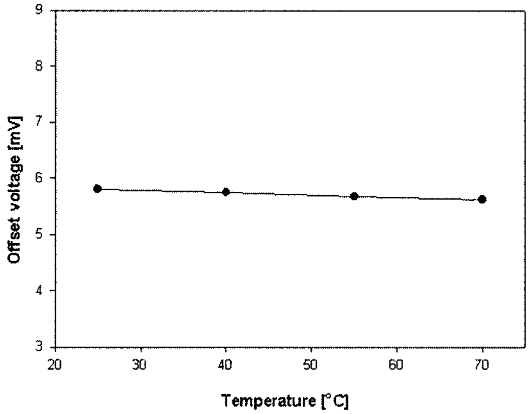

그림 10. 온도에 따른 offset 전압의 변화.
Fig. 10. Offset voltage variation versus temperature.

이러한 특성은 각 소자마다 그 특성이 조금 다르지만 대체적으로 -0.07% FS/℃정도의 특성이 나타남을 알 수 있었다. 이러한 특성은 일반적으로 각 소자마다 재현성을 가지므로 이에 상응하는 각각의 온도 보상을 통하여 그 특성을 원하는 사양 내에 들게 할 수 있다. 그리고 여기에서 각 소자의 offset 전압이 대기압에서 1 V 전원 인가시 대체적으로 6 mV 정도의 출력이 나온다는 것으로 소자의 감도가 약 6 mV/bar·V 임을 알 수 있다.

제작된 봉입형 압력 트랜스미터의 특성은 압력센서 cell을 오일에 넣고 박판 다이아프램으로 봉입할 경우 실험적으로 박판 다이아프램의 두께가 0.4 mm까지는 박판에 주어진 압력을 손실없이 그대로 오일 내에 있는 cell에 전달하지만, 온도에 의한 내부 오일 팽창으로 offset 전압의 변동이 심하고, 압력과 온도에 대한 응답 특성 및 히스테리시스 특성이 매우 불안하다는 결론을 얻을 수 있었다. 따라서, 박판 다이아프램은 가능한 얇고 충분한 주름이 주어져야 할 것이다.

그림 11은 박판 두께에 따른 오차 정도를 나타내고 있다.

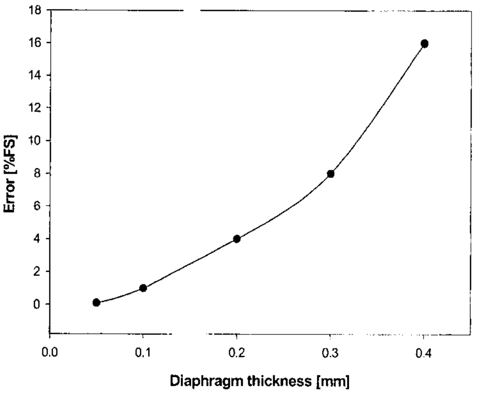

그림 11. 박판 두께에 따른 출력 오차.
Fig. 11. Output error versus diaphragm thickness.

그림 12는 제조된 실리콘 압저항형 절대압 센서에 XTR105의 공급 전류 0.8 mA의 전원을 공급하고 현 대기압을 기준으로 0~10 bar의 범위에서 온도를 변화시키면서 출력을 측정한 그래프이다. 24 °C에서 압력 변화에 따른 소비 전류 변화량을 1.6 mA/bar로 조정하였을 때, 온도 및 압력에 대한 특성을 나타내고 있으며, 보상 전 출력 특성은 ±5% FS 정확도를 가짐을 알 수 있다.

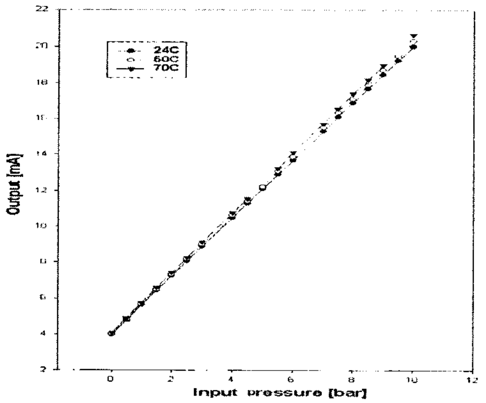

그림 12. 보상전 압력 발신기의 출력 특성.
Fig. 12. Output characteristics of the transmitter before temperature compensation.

일반적으로 절대압 센서인 경우 온도 보상 전의 특성은 정전압을 공급하였을 때는 온도에 대해서 출력 감도가 감소하는 것이 보통이다. 그러나, 그림에서 보는 바와 같이 정전류를 공급할 경우 온도에 대해서 출력 감도가 증가함을 알 수 있다. 이는 온도가 상승하면 브릿지 저항의 증가가 일어나고, 이에 대응하여 브릿지 양단에 걸리는 전압이 상승하기 때문이다. 이러한 특성은 발신기 회로에서 Rg 저항을 온도에 따라서 저항값이 증가하는 온도 저항을 사용하는 이유이다.

그림 13은 발신기 회로에서 온도 보상을 한 후의 온도 및 압력에 대한 출력 특성이다. 그림에서 보는 바와 같이 온도 및 압력에 대해서 상당히 안정되어 있으며 목표로 하는 ±1% FS이내에 있음을 알 수 있다.

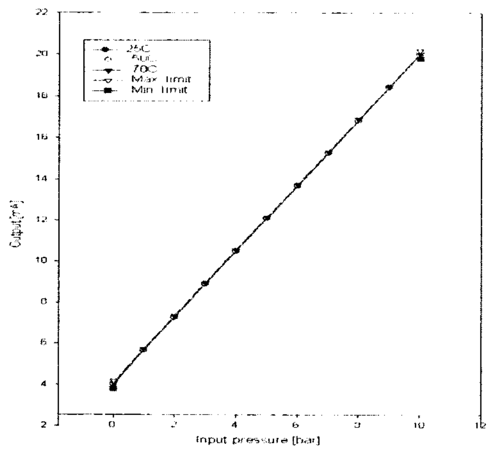

그림 13. 보상 후 압력 발신기의 출력 특성.
Fig. 13. Output charecteristics of transmitter after temperature compensation.

IV. 결 론

SDB 웨이퍼를 이용하여 압저항형 절대압 센서를 제조하고 이를 압력 발신기에 응용하였다. 본 연구에서는 SDB 웨이퍼를 이용하여 다이아프램 두께의 균일성을 이루었고, 이온주입법으로 저항을 형성하여 도핑 농도를 균일하게 하였기 때문에 센서 cell들의 감도를 일정 범위 내에 유지할 수 있었다. 따라서 감도를 조정하기 위한 외부 저항의 범위를 최소화할 수 있었다. 또한 온도 특성도 웨이퍼 전체에 걸쳐 센서 cell들이 같은 특성을 나타내었다.

압력 매체에 의한 압력센서 cell의 손상을 방지하기 위하여 압력 매체와 압력센서 cell사이에

스테인레스 박판(0.05mm)과 실리콘 오일을 둔 isolated type 압력센서를 제작하였으며, 온도 보상을 위해서 발신기용 전용 chip을 이용하였고, 이 chip 고유의 특성을 그대로 이용하여 온도 보상을 행하였다. 그 결과로 제작된 압력 발신기의 정확도는 ±1.0% F.S로 나타났다.

참 고 문 헌

〔1〕 W. G. Wolber and K. D. Wise, "Sensor development in the micro-computer age", IEEE Trans. on Electron Devices, vol. ED-26, no.12, pp. 1864-1874, 1979.

〔2〕 R. Johnson and R. E. Higashi, "A highly sensitivity silicon chip micro-transducer for air flow and differ-ential pressure sensing application", Sensors and Actuators, vol.11, pp.63-72, 1987.

〔3〕 K. M. Mahmoud, R. P. Van Kampen, M. J. Rutka and R. F. Wolffen buttel, "A silicon integrated smart pressure sensor", Transducers' 93, pp.217-220, 1993.

〔4〕 F. M. d'Heurle, "Metallurgical topics in silicon device interconnectons : thin film stresses", Inter. Materials Reviews, vol.34, pp.53-68, 1989.

〔5〕 K. Okada, K. Nuri, S. Yagawara, A. Shiomura, T. Takizawa, H. Kishi and M. Nakamura, "Temperature drift in silicon diaphragm piezore-sistive pressure sensors", Technical Report of Tensen, vol. 69, pp.41-57, 1988.

〔6〕 K. Yamada, M. Nishihara, S. Tanabe, M. Shimazae and Y. Matsuoka, "Nonlinearity of the piezoresistance effect of p-type silicon diffused layers", IEEE Trans. on Electron Devices, vol. ED-29, pp.71-77, 1982.

〔7〕 김우정, 최시영," PC를 이용한 압저항형 압력센서의 온도 보상", 대한전자공학회 논문집, vol.28-A, no. 7, pp.54-64, 1991.

〔8〕 이창준, 강신원, 최시영, " SDB 웨이퍼를 이용한 절대압 실리콘 압력센서의 제조", 한국 센서학회지, vol. 4, no. 1, pp.29-34, 1995.

著 者 紹 介

김 우 정

1966년 7월 30일생
1989년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1991년 동대학 전자공학과 반도체전공 졸업(석사)
1996년 ~ 현재 동대학 전자공학과 박사과정
2000년 ~현재 (주)맨텍 대표이사
주관심 분야 : MEMS, 센서, 시스템개발

조 용 수

1973년 10월 8일생
1992년 인제대학교 전자공학과 졸업(공학사)
2000년 경북대학교 전자공학과 반도체전공 졸업(석사)
현재 ~ 경북대학교 전자공학과 박사과정, (주) 맨텍 연구원

황 정 훈

1960년 4월 17일생
1986년 영남대학교 토목공학 졸업(공학사)
2000년 경북대학교 전자재료 졸업(석사)
1986년 ~ 현재 대구도시가스(주) 연구개발팀 팀장

최 시 영

1949년 9월 4일생
1972년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1974년 경북대학교 대학원 졸업(공학석사)
1986년 일본 동북대 대학원 졸업(공학박사)
1978년 ~ 현재 경북대 전자전기공학부 교수
경북대학교 센서기술연구소 소장
한국반도체학술대회 분과 위원장
주관심 분야 : 실리콘 공정 및 소자제조, 압력센서 및 가속도센서, TFT 공정, Cu CVD 및 전해도금, PDP, 고속 스위칭 다이오드.