2013년 6월 전자공학회 논문지 제 50 권 제 6 호
Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea Vol. 50, NO. 6, June 2013 http://dx.doi.org/10.5573/ieek.2013.50.6.305

논문 2012-50-6-35

SDB 구조의 고온용 실리콘 압력센서

(High Temperature Silicon Pressure Sensor of SDB Structure)

박 재 성*, 최 득 성*, 김 미 목**

(Jae-Sung Park©, Deuk-Sung Choi, and Mi-Mok Kim)

요 약

본 연구는 Si/SiO_2/Si-sub 구조의 SDB(silicon-direct-bonding) 웨이퍼를 이용한 고온용 압력센서의 제작 및 특성을 연구한 것이다. 압력센서는 SDB 웨이퍼의 첫 번째 층의 단결정 실리콘을 이용하여 압저항을 제작하기 때문에 감도가 우수하며, 두 번째 층의 산화막으로 압저항과 실리콘 기판을 절연 분리하여, 일반적인 실리콘소자의 사용 온도 한계인 120℃ 이상의 고온에서도 사용이 가능하다. 제작된 압력센서는 고감도의 압력감도 및 센서 출력의 직선성 및 히스테리시스 특성이 매우 우수함을 알 수 있었다.

Abstract

In this paper, the pressure sensor usable in a high temperature, using a SDB(silicon- direct-bonding) wafer of Si/SiO_2/Si-sub structure was provided and studied the characteristic thereof. The pressure sensor produces a piezoresistor by using a single crystal silicon as a first layer of SDB wafer, to thus provide a prominent sensitivity, and dielectrically isolates the piezoresistor from a silicon substrate by using a silicon dioxide layer as a second layer thereof, to be thus usable even under the high temperature over 120℃ as a limited temperature of a general silicon sensor. The measured result for a pressure sensitivity of the pressure sensor has a characteristic of high sensitivity, and its tested result for an output of the sensor further has a very prominent linearity and hysteresis characteristic.

Keywords : Pressure sensor, High temperature, Silicon, SDB(silicon- direct-bonding)

Ⅰ. 서 론

최근에 자동차를 비롯한 각종 시스템들이 첨단화되면서 고정도의 제어가 필요하게 되고, 따라서 고성능 센서의 필요성은 더욱 높아지고 있다. 특히, 고온, 고압, 방사능 분위기와 같은 극한 환경에서 사용이 가능한 센서 개발 요구가 높아지고 있다.

본 연구에서는 SOI(silicon-on-insulator) 구조를 이용하여 고온 분위기에서 사용이 가능한 고온용 실리콘 압력센서를 개발했다. 실리콘 압력센서는 세라믹스 및 금속 압력센서에 비해서 소형, 고감도이며, 신호처리 회로를 같은 칩(chip) 상에 집적시키는 one-chip화가 가능하다. 또한 실리콘을 사용하기 때문에 반도체 공정 기술을 이용한 대량생산이 용이하다는 장점이 있다. 일반적으로 실리콘 압력센서는 얇은 다이야프램(diaphragm) 위에 확산 압저항(piezoresistor)을 형성하여 제작한다. 확산저항을 사용할 경우에는, p-n 접합을 통한 누설 전류 때문에 120℃ 이상에서는 사용이 불가능하다. 따라서 120℃ 이상의 고온에서도 사용이 가능한 압력센서를 제작하기 위해, 절연막으로 반도체 기판과 절연 분리된 압저항 구조를 생각할 수 있다[1~2]. 본 연구에서는, 실리콘 기판과 절연 분리된 구조의 단결정 실리콘 압저항을 제작하기 위해, 비교적 안정된 전기적 특성을 나타내는 SDB(Si/SiO_2/Si-sub) 웨이퍼를 이용하여 고온용 압력센서를 제작한다.

* 정회원, 영남이공대학교 전자정보계열
(Dept. of Electronic & Information Engineering, YNC)
** 정회원, (주)엔터기술
(Enter-Tech Co., Ltd.)
※ 이 연구실적물은 2011학년도 영남이공대학 연구조성비 지원에 의한 것임
© Corresponding Author(E-mail: pjssung@ync.ac.kr)
접수일자: 2013년2월19일, 수정완료일: 2013년5월27일

Ⅱ. 고온용 압력센서

1. 압력센서 구조

그림 1에서 스테인리스스틸로 패키지된 압력센서의 구조를 나타냈다. 센서는 스테인리스스틸 패키지 내에 실리콘 압력센서가 장착되어 있는 구조로 되어있다. 이 압력센서는 압력이 직접 실리콘 압력센서 칩의 다이아프램에 가해지는 구조로 설계된 것이다.

그림 2에서 나타낸 것과 같이, 일반적인 실리콘 압력센서의 압저항은 집적회로 제작공정을 이용하여 pn접합 저항 형태(그림 2(a))로 제작된다. 그러나 pn 접합형 압저항은 120℃ 근처에서, pn접합을 통한 대량의 누설전류가 발생하기 때문에 고온에서의 사용이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 300℃ 이상의 고온에서 사용할 수 있는 실리콘 압력센서를 제작하기 위해서, 압 저항을 절연막으로 완전히 절연 분리시켜서, 누설 전류를 극적으로 감소시킬 수 있는 SOI 구조를 사용했다(그림 2(b))[1].

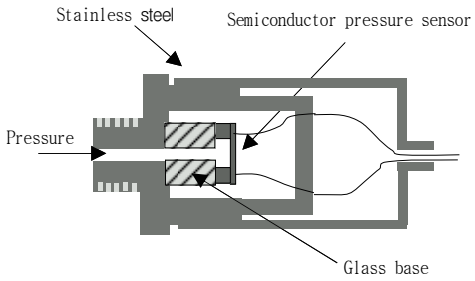


그림 1. 압력센서 구조
Fig. 1. Structure of the Pressure Sensor.

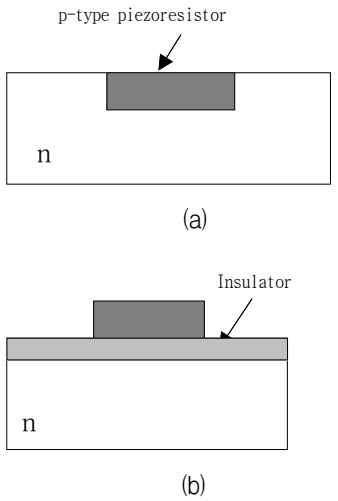


그림 2. 일반적인 실리콘 압 저항의 형태
(a) pn 접합, (b) SOI 구조
Fig. 2. Configuration of the Piezoresistor using,
(a) pn junction, (b) SOI structure.

절연 분리된 압 저항을 제작하는 방법으로는, CVD(chemical vapor deposition)공정을 이용하여 절연체 위에 다결정 실리콘을 성장시키는 방법, SIMOX (separation by ion implantation) 웨이퍼를 이용하는 방법, SOS(silicon-on-sapphire) 웨이퍼를 이용하는 방법[1,3~4] 및 SDB(silicon-direct- bonding) 웨이퍼를 이용하는 방법 등이 있다[5]. 먼저 CVD를 이용하여 다결정 실리콘을 성장하는 방법은, 압 저항을 다결정 실리콘으로 제작하기 때문에 센서의 감도가 낮아지는 문제가 있고, SIMOX 웨이퍼는 절연 특성 및 절연분리 공정상에 문제가 발생할 수 있으며, SOS 웨이퍼는 아직 연구 단계로 본격적인 상품화가 되어있지 않다. 본 연구에서는 상품화가 완료 단계에 있고, 절연 특성이 우수하며, 단결정 압저항을 제작할 수 있는 SDB 웨이퍼를 이용하여 고감도의 고온용 압력센서를 제작했다.

2. SDB 구조를 이용한 고온용 압력센서

그림 3에서 압력센서의 구조를 나타냈다. 압력센서의 구조는 정방형 다이아프램 위에 전단 응력형 압 저항인 single-element four-terminal piezoresistor[1,4,6,7]를 다이아프램 가장자리에 배치한 구조로 되어있다. 압 저항은 단결정 실리콘이며, SiO_2 절연막으로 실리콘 기판과 절연 분리되어 있다. 압 저항은 4개의 단자로 구성되고, 2개의 단자는 전원용, 2개는 출력용 단자로 사용된다.

전단응력형 압 저항은, 다이아프램 상에 분포하는 전단응력에 민감한 소자로, 그림 4에서 나타낸 것과 같이

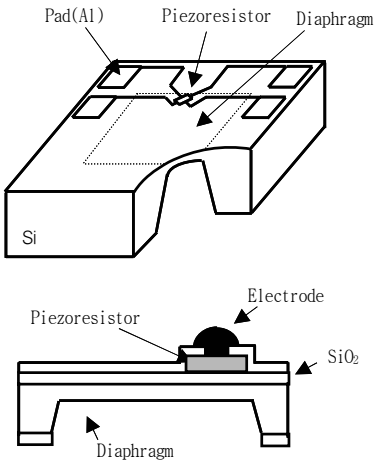


그림 3. SOI구조의 압력센서의 구조와 단면도
Fig. 3. Structure of the Pressure Sensorwith SOI Structure and the Cross-sectional View.

하나의 저항에 4개의 단자를 사용한다고 해서, single-element four-terminal piezoresistor라고도 한다. 이 소자의 특성을 다음 식과 같이 Ohm's law으로 나타낼 수 있다[8].

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho'_1 & \rho'_6 \\ \rho'_6 & \rho'_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j'_x \\ j'_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

이 식 (1)에서 E'_x, E'_y는 x' 방향과 y' 방향의 전계, ρ는 저항률, j는 전류를 나타내고 있다(그림 4참조). 만약 $j'_x \neq 0$, $j'_y = 0$ 이면,

$$E'_y = E'_x \frac{\rho'_6}{\rho'_1} \quad (2)$$

다시 나타내면,

$$v'_y = \frac{W}{L}\frac{\rho'_6}{\rho'_1} v_s \quad (3)$$

여기서 ρ'_1 은 대략 ρ_0와 같고,

$$\rho'_6 = \rho_0[\pi'_{61}\sigma'_1 + \pi'_{62}\sigma'_2 + \pi'_{66}\sigma'_6] \quad (4)$$

여기서, π는 압저항계수로, π'_{61}, π'_{62}는 아주 작은 값으로 무시할 수 있어서, 최종적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\rho'_6}{\rho_0} = \frac{1}{2}\pi_{44}(\sigma_x - \sigma_y)\sin(2\alpha) \quad (5)$$

식 (5)로부터, 전단응력형 압저항의 배치는 전단응력이 최대인 지점(정방형 다이아프램인 경우에는 다이아프램 가장자리 부분)에 α=45°방향으로 해야 한다[8]. 압저항의 크기는, 너무 크면 센서 출력의 비직선성 문제가 발생할 수 있고, 너무 작으면, 센서 제작 시에 정렬

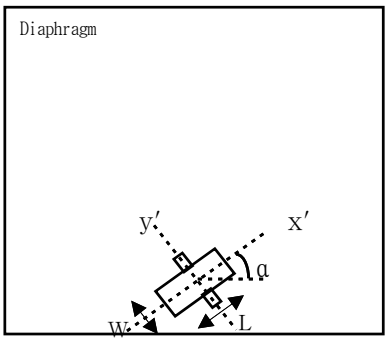
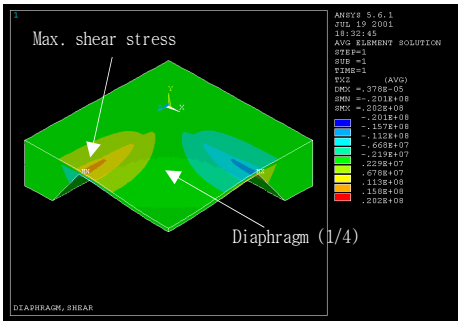


그림 4. 전단응력형 압력센서의 모형도
Fig. 4. Schematic Diagram of the Shear Stress type Pressure Sensor.

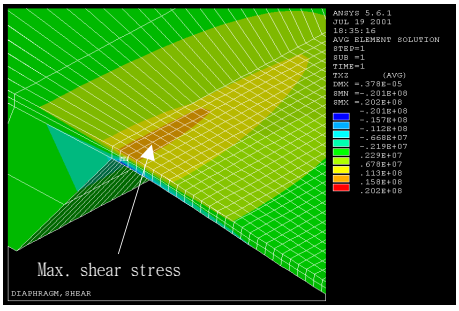
(alignment) 오차에 의해, 출력 감도가 고르지 않는 문제가 발생할 수 있다. 식 (3)으로부터, 압저항의 W가 클수록 감도가 증가함을 알 수 있다. 그러나 W/L가 1보다 클 경우에 단락(short circuit) 효과가 문제가 되기 때문에, 본 연구에서는 W/L=1, 출력 측 전극의 W/l=1로 설계했다[8]. 압력센서의 기하학적인 크기, 압저항의 배치 위치 등 센서 설계에는 ANSYS 시뮬레이션 결과를 이용하여 실시했다. 그림 5에서 다이아프램(1/4 구조) 상의 전단응력 분포의 시뮬레이션 결과를 나타냈다. 다이아프램의 크기는 2200× 2200(㎛^{2})로, 다이아프램의 두께는 40㎛으로 설계했다.

3. 압력센서 제작공정

압력센서 제작에 사용한 웨이퍼는 일본의 ShinEtsu 제품으로 두께가 Si(1.5㎛)/SiO_2(1㎛)/Si(525㎛)이며, 압저항이 제작될 실리콘 면은 p-type 단결정 실리콘 면으로 저항률이 10-20Ωcm 이다. 제작공정은 웨이퍼 양면을 습식 산화(wet oxidation) 공정으로 1㎛의 산화막(SiO_2)을 형성하고, 웨이퍼 뒷면에 40㎛ 깊이의 V-groove를 형성했다. 다이아프램 형성을 위하여, 웨이



(a)



(b)

그림 5. 다이아프램(1/4 구조) 상의 전단응력 분포의 ANSYS 시뮬레이션 결과
Fig. 5. Simulated Shear Stress Distribution in One-quarter of the Square Diaphragm by ANSYS.

퍼 전면을 산화막으로 보호하고, 뒷면에 TMAH 에칭으로 다이야프램을 형성했다. 이때, 다이야프램 형성 시점의 판단은 미리 측정한 에칭 속도에 의한 시간 계산과 v-groove의 관찰로 했다.

에칭 속도는 90℃에서 약 0.78㎛/min 정도였으며, TMAH 용액에 대한 실리콘과 산화막(SiO2)의 에칭 선택비가 1560 : 1 이상임을 측정에 의해 알 수 있었다 .

양면의 산화막을 전부 제거하고, 웨이퍼 전면에 이온 주입 공정을 이용한 불순물 농도 조절을 시행한다. 본 연구에서는 센서의 감도 및 온도 특성 등을 고려하여, 불순물 농도를 약 5×10^{17} cm^{-3} 정도로 조절했다. 압저항을 형성하기 위하여, 웨이퍼 전면에 포토레지스터를 이용하여 압저항 패턴을 형성하고, RIE(reactive ion etching)를 이용하여 건식 에칭(dry-etching)을 실시했다.

SiO_2 CVD(chemical vapor deposition) 공정으로 전면 절연막을 형성하고, 콘택(contact)을 형성하여, 마지막으로 스퍼터(sputter)를 이용하여 배선 및 전극을 형성했다. 잔류응력에 의한 오프셋을 줄이기 위해서, 실리콘 압력센서와 실리콘과 열팽창계수가 비슷한 Pyrex #7740을 양극접합(anodic bonding) 한 후에 패키지에 접착했다. 그림 6에서 제작한 압력센서와 패키징된 압력센서의 사진을 나타냈다.

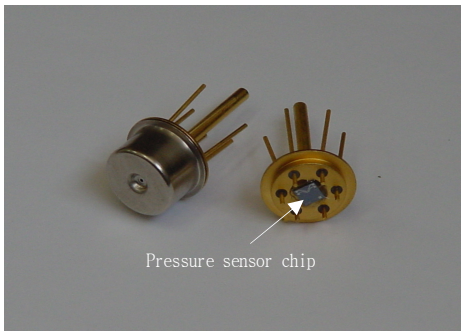


그림 6. 압력센서의 사진
Fig. 6. Photograph of the Pressure Sensor.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 고온용 압력센서 특성 분석

제작된 압력센서의 특성을 분석하기 위하여, 압력과 온도를 동시에 변화시키면서 측정할 수 있는 측정시스템을 사용했다. 압저항을 구동하기 위하여 압저항의 전원단자에 5V의 직류전압을 인가했다. 압저항의 출력단자에 디지털 멀티미터를 연결하고, 압력을 변화시키면서 출력단자의 전압 변화를 측정하였다. 측정에 사용한 압력 범위는 0~100kPa 이다.

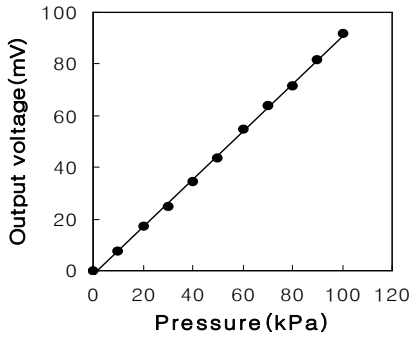


그림 7. 압력센서의 출력특성
Fig. 7. Output Characteristics of the Pressure Sensor.

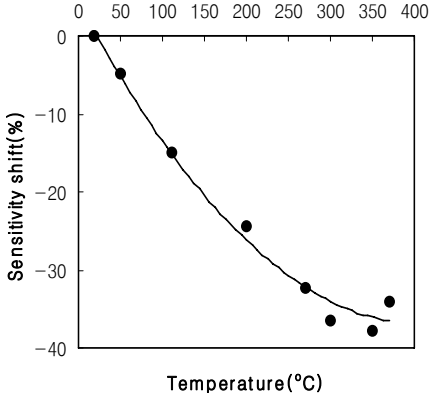


그림 8. 압력센서의 온도특성 분석
Fig. 8. Temperature Effect on Full Scale Span.

그림 7에서 압력센서의 출력특성의 측정 결과를 나타냈고 결과에서 압력감도는 약 183.6㎶/V·kPa, 비직선성 및 히스테리시스는 각각 1.3%FS 및 0.9%FS를 나타냈다. 측정된 압력감도는 일반적인 단결정 실리콘 압저항이 나타내는 압력감도에 매우 근접한 값으로, 압저항형 압력센서 제작에 SDB 웨이퍼를 사용함에 있어서 특별한 재료적, 구조적인 문제점은 없는 것으로 간접적인 평가가 가능하다.

제작된 압력센서의 온도 특성을 분석하기 위하여, 측정 시스템의 로(furnace) 내에 압력센서를 설치하고, 로 내의 온도를 18℃에서 370℃까지 변화시키면서 압력센서의 감도 온도특성 및 영점 오프셋 온도특성을 측정했다. 그림 8에서 측정 결과를 나타냈다. 18℃에서 184.6 ㎶/V·kPa 의 감도를 나타내다가, 370℃에서는 감도가 121.4 ㎶/V·kPa로 떨어져서, 0.097 %FS/℃의 감도 온도특성을 나타냈다. 영점 오프셋 온도특성은 측정 결과 보상 없이 약 0.026 %FS/℃ 의 값을 나타냈다. 일반 실

표 1. 고온용 압력센서의 사양
Table 1. Specification of the High Temperature Pressure ensor.

항 목	규 격
제작 압력범위	100 kPa
허용 최대 압력범위	압력 범위의 2배
전원	DC 5 V
출력전압(span)	92 mV (TYP)
압력감도	183.6 μV/V・kPa
비직선성	1.3 %FS 이내
히스테리시스	0.9 %FS 이내
측정 온도범위	18~370℃
사용 온도범위	-40~370℃
감도 온도특성	0.097 %FS/℃
영점 오프셋	4.8 mV
영점오프셋 온도특성	0.026%FS/℃

리콘 압력센서와 비교할 때, 감도 온도특성 및 영점 오프셋 온도특성이 다소 높게 나타났지만, 실리콘 사용 한계 온도인 400℃ 근처까지의 측정 결과로는 만족할 만한 수준이라 생각된다. 압력센서의 장기 안정도(long term stability)를 측정하기 위하여 30시간 동안의 영점 오프셋 변동을 관찰한 결과, 영점 오프셋은 30시간 동안 0.5%FS 이내의 변화 폭을 유지했다.

특히 20시간 이후부터는 0.1%FS 정도의 안정된 변화 폭을 유지했다. 장기 안정도 측정기간 동안 측정 챔버 내에 약 ± 1℃ 정도의 온도 변화가 관찰되었다.

표 1에서 제작된 고온용 압력센서의 측정된 사양을 나타냈고 고온용 압력센서의 특성은 측정 과정에서 어떠한 보상도 하지 않은 결과로, 구조적, 회로적인 보상을 실시한다면 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

2. 고온용 압력센서 개발 현황

실리콘 압력센서는 산업 및 의료 현장에서 대량으로 사용되고 있는 센서 중에 하나로, 현재 다양한 종류의 압력센서가 개발되어 시판되고 있다. 압력센서 시장은 1995년도에 24억불이었던 것이, 2005년도에는 50억불 이상으로 성장할 것으로 예측되고 있기 때문에, 압력센서의 응용 분야는 더욱 확대될 것으로 생각된다[9]. 반도체식 압력센서를 시판하고 있는 세계적 메이커로는 미국의 Nova Sensor, Honey well, Motorola, GM 등이 있고, 유럽에 Phillips, 일본에 Toyoda 공기, Nagano 계기, 코팔전자 등이 있다. 현재 시판되고 있는 전체 압력센서 중에 실리콘 압력센서가 차지하는 비율이 60% 이상이며[9], 시판되고 있는 각종 실리콘 센서 중에서는 75% 이상을 점유하고 있다[10].

고온용 실리콘 압력센서의 경우에는 아직 시장 진입이 미미한 상태로, 현재 개발 단계에 있다. 고온용 실리콘 압력센서 개발을 지속적으로 진행하고 있는 회사로는, 미국 Honey well, 일본의 Toyoda 공기 및 Nagano 계기 등이 있다. Honey well은 SOI 구조를 응용하여 -55℃~225℃ 범위의 압력센서와 SIMOX(separation by implantation of oxide) 기판을 이용한 고온용 신호처리회로를 동시에 개발 중에 있다. 일본의 Toyoda 공기[3] 및 Nagano 계기 등은 SOS(silicon-on-sapphire: Si// Al_2O_3//Si-sub) 기판을 응용한 고온용 압력센서 개발에 주력하고 있으며, 특히 Nagano 계기는 -30~230℃ 온도 범위에서 사용이 가능한 센서의 개발을 완료한 상태에 있다.

현재, 고온용 실리콘 압력센서의 시장 진입이 늦어지고 있는 원인으로는 센서의 생산 단가가 일반 실리콘 압력센서에 비해서 높다는 것으로, 생산 단가를 절감하기 위한 지속적인 연구가 필요한 실정이다. 현재 고온용 압력센서의 주재료가 되고 있는 기존의 SOI 기판에 대한 연구 및 개발이 지속적으로 이루어지고 있으며, 또한 새로운 형태의 고품질, 저가의 SOI 기판도 다양하게 개발되어 출시되고 있기 때문에 고온용 압력센서의 생산 단가의 절감 요인은 아직 많이 남아있는 것으로 판단된다. 기계식 압력센서가 매년 1~2%의 판매 가격 상승을 나타내는 반면에 실리콘 압력센서는 매년 5~10% 정도 가격이 하락하고 있어[9], 산업 현장을 중심으로 빠르게 기계식 압력센서에서 실리콘 압력센서로의 대체가 진행되고 있다. 따라서 현재 기계식 압력센서를 사용하고 있는 현장의 고온 분위기의 시스템에도 실리콘 압력센서로의 대체가 이루어질 것으로 기대되며, 이를 위한 준비가 필요한 실정이다.

Ⅳ. 결 론

Si/SiO_2/Si-substrate 구조의 SDB 웨이퍼를 이용하여 고온용 압력센서를 제작했다. 제작한 압력센서의 압력감도를 측정하여, 183.6 μV/V・kPa의 고감도의 특성을 나타냄을 알 수 있었다. 또한 센서 출력의 직선성 및 히스테리시스 특성은, 각각 1.3%FS 및 0.9%FS로 비교적 우수함을 알 수 있었다. 감도 온도특성 및 영점 오프셋 온도특성을 18℃에서 370℃ 사이의 온도범위에서 측

정한 결과, 각각 0.097%FS/℃ 및 0.026%FS/℃를 나타냈다.

이상의 결과로부터, 개발된 고온용 압력센서는 300℃ 이상의 고온 분위기에서의 사용이 가능하며, 특수한 패키징만 개발된다면, 자동차 엔진 등과 같은 고온, 고압의 극한 분위기에서의 사용이 가능할 것으로 판단된다. 고온용 실리콘 압력센서 상품화의 진전을 위해서는 생산단가를 획기적으로 낮추기 위한 재료 및 공정 개발이 필요할 것으로 생각된다.

REFERENCES

[1] Y.T.Lee, H.D.Seo, M.Ishida, S. Kawahito and T.Nakamura, "High temperature pressure sensor using double SOI structures with two Al2O3 films", Sensors and Actuators, Vol. 43, pp. 59-64, 1994.

[2] M.Ishida, Y.T.Lee, T.Higasgino, H.D.S대 and T.Nakamura,"Double SOI structure and device applications with heteroepitaxial Al2O3 and Si", Jpn. J. Appl. Phys., Part1, No. 2B, pp831-835, 1995.

[3] H.Terabe, H.Arashima, N.Ura, K.Suzuki, K. Ohta and M.Ishida,"A silicon pressure sensor with stainless diaphragm for high temperature and chemical application", International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago USA, pp1481-1484, 1997.

[4] G.S.Chung, S.Kawahito, M.Ishida, T.Nakamura, M.Kawashima and T.Suzuki, "High-performance pressure sensors using double SOI structure, Rev. Sci. Instrum., 62, pp1341-1346, 1991.

[5] 이영태, 이용성, 전교석, "고온용 실리콘 압력센서 개발(자동차 엔진의 연소가스 압력 측정용)", 제4회 한국 MEMS 학술대회 초록집, pp220-225.

[6] Y.Kanda,"Optimum design consideration for silicon pressure sensors using four terminal gauge", Sensors and Actuators, Vol. 4, pp. 199-206, 1983.

[7] M.Bao and Y.Wang, "Analysis and design of a four-terminal silicon pressure sensor at the centre of a diaphragm", Sensors and Actuators, 12, pp49-56, 1987.

[8] Min-Hang Bao, Wei-Jia Qi and Yan Wang, "Geometric design rules of four-terminal gauge for pressure sensors", Sensors and Actuators, 18, pp1031-1033, 1989.

[9] 특허청, "2000 신기술 동향조사 보고서(센서기술)", 전기/전자분야 제4권, pp83-98, 2000.

[10] 전자부품연구원 마이크로센서연구실 홈페이지, "http://www.keti.re.kr/ps-nrl/, 2003.

저 자 소 개

박 재 성(정회원)
1986년 영남대학교 전자공학과 학사.
1990년 영남대학교 전자공학과 석사.
2000년 영남대학교 전자공학과 박사.
2002년~현재 영남이공대학교 전자정보계열 교수
<주관심분야 : 전자재료, 반도체공정>

최 득 성(정회원)
1985년 고려대학교 전자공학과 학사.
1987년 한국과학기술원 전기·전자공학과 석사.
1995년 한국과학기술원 전기·전자공학과 박사.
2010년~현재 영남이공대학교 전자정보계열 조교수
<주관심분야 : 반도체화학 및 소자>

김 미 목(정회원)
1986년 영남대학.교 전자공학과 학사.
1990년 영남대학교 전자공학과 석사.
2004년 영남대학교 전자공학과 박사
2005년~현재 (주)엔터기술 실장
<주관심분야 : 반도체센서, MEMS>