

브리지조합 검출방식을 이용한 고온용 3축 가속도센서 제작

손 미 정, 서 희 돈

Fabrication of the Three Dimensional Accelerometer using
Bridge Combination Detection Method

Mi-Jung Son, Hee-Don Seo

요 약

본 논문에서는 3축의 가속도를 검출하기 위한 새로운 방식인 브리지조합 검출원리를 제안하고, SOI 구조의 웨이퍼를 이용하여 200℃ 이상 고온에서 동작이 가능한 압저항형 실리콘 가속도센서를 제작하였다. 제작된 센서의 감도는 x 및 y축이 8mV/V·G, z 축이 40mV/V·G 이었다. 그리고 출력전압의 비선형성은 1.6%FS, 타축감도는 약 4.6% 이하였다. 이것은 외부 연산회로를 이용하여 3축의 가속도성분을 검출하는 방법에 비해 검출방식은 간단하면서도, 특성은 거의 동일하였다. 또한 SOI 구조를 이용하여 고온에서도 안정한 동작을 하였다. 제작된 가속도센서의 오프셋전압 온도계수와 감도 온도계수는 27℃에서 각각 1033ppm℃⁻¹ 와 1145ppm℃⁻¹ 이었다.

Abstract

In this paper, we proposed the new bridge combination detection method for three dimensional piezoresistive silicon accelerometer, and the accelerometer with SOI structures was fabricated by bulk micromachining technology for using higher temperature than 200℃. The sensitivities of fabricated accelerometer for X, Y and Z-axis acceleration were about 8mV/V·G, 8mV/V·G and 40mV/V·G. The nonlinearity of the output voltage was 1.6%FS and cross-axis sensitivity was within 4.6%. We confirmed that the three bridges detection method is very simple and the output characteristics of this accelerometer were similar to arithmetic circuit method accelerometer. The temperature characteristics of SOI structure accelerometer showed high operating temperature and good stability. And the temperature coefficient of offset voltage and sensitivity were 1033ppm℃⁻¹ and 1145ppm℃⁻¹ respectively.

1. 서론

최근 실리콘 가속도센서를 로봇의 제어 및 자동차의 에어백과 능동제어 서스펜션 시스템, 엔진의 노킹 발생 감지, 기계의 이상 진동 감지 등 산업분야 전반에 실용화하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.^[1] 특히 최근 자동차가 점점 고급화가 되어감에 따라 차량 자세 제어, 차량 높이제어, 안정성 및 승차감 등 차량 성

능을 향상시키기 위한 자동차 종합 제어시스템 중 자동 능동제어 현가장치에 많은 센서들이 필요로 하고 있다. 그러나 아직 실리콘 가속도센서를 자동차 엔진과 같은 200℃ 이상의 고온 환경하에서 실용화하기에는 문제가 많다. 또 지금까지는 x, y, z 방향의 가속도 벡터량을 측정하기 위해서는 3가지 소자가 필요하기 때문에 능동 현가장치에서 전후, 좌우 및 상하의 가속도를 측정하기 위해서는 각각 1축 검출 전용센서를 장착하고 있다. 그러나 가속도는 방향성을 갖는 벡터량 임

영남대학교 전자정보공학부 (School of Electrical eng. & Computer Science, Yeungnam University)

<접수일자 : 2000년 4월 11일>

으로 하나의 센서소자로 3축 가속도를 측정할 수 있다. 3축 가속도성분을 동시에 검출하는 간단한 방법은 1축 센서소자를 3개 조합하여 3차원 량을 측정하는 것^[2]인데, 3개의 센서간의 정확한 위치관계의 구성이 어렵다. 이 문제를 해결하기 위해 K.Okada^[3]나 H.Takao^[4]등에 의해 하나의 소자에 연산회로를 이용한 3축의 가속도 성분을 분리 검출하는 방법이 보고되었다. 그러나 이 방법은 센서소자 외부에 신호처리를 위한 회로를 구성해야 하므로 복잡하고 동작 불안정화의 원인이 된다.

본 연구에서는 하나의 센서소자 내에 압저항을 이용한 브리지 조합 검출방식을 갖는 3축 가속도센서를 제안하였다. 이 방식은 가속도가 인가될 때 변화하는 각 브리지회로의 조합을 통하여 x, y, 및 z축의 가속도를 검출한다. 그리고 자동차 엔진과 같은 고온용 센서로 사용하기 위하여 실리콘 직접 접합기술로 제작된 SOI(silicon on insulator) 구조^[5,6]의 센서를 제작하였다.

2. 브리지 조합을 이용한 가속도의 검출 원리

그림 1은 본 논문에서 제안한 브리지 조합을 이용하여 가속도를 검출하기 위하여 설계된 센서의 압저항 배치도이다. 각 빔(beam) 당 2개씩 4개의 빔에 8개의 저항이 배치되어 있고, 가속도가 임의의 축 방향으로 가해질 경우 저항은 “양(+)” 또는 “음(-)”의 저항값 변화를 가진다.

표 1은 이 센서에 x, y 및 z축으로 각각 가속도가 가해질 경우 저항값의 변화를 나타낸 것이다.

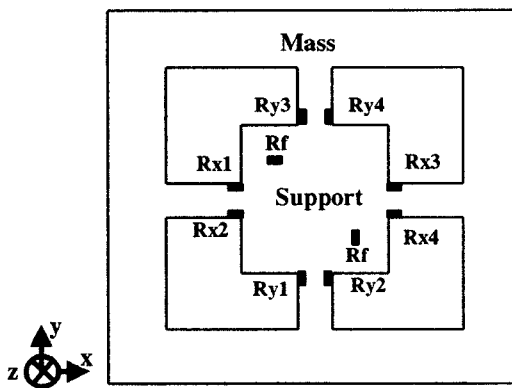


그림 1. 압저항 배치도

Fig. 1. Configuration of piezoresistor.

표 1. 가속도에 인한 압저항의 변화

Table 1. Change of piezoresistors in acceration

Resistor Axis	Rx1	Rx2	Rx3	Rx4	Ry1	Ry2	Ry3	Ry4
Ax	+	+	-	-	+	-	+	-
Ay	+	-	+	-	+	+	-	-
Az	+	+	+	+	+	+	+	+

Rx1, Rx2, Rx3 및 Rx4 는 x축 검출브리지의 저항성분이고, Ry1, Ry2, Ry3 및 Ry4 는 y축 검출브리지의 저항성분이다. 그리고 z축 검출브리지는 두 개의 참조 저항(Rf)과 x축 검출브리지의 양단 저항 값과 y축 검출브리지의 양단 저항값으로 구성된다. 그리고 가속도가 인가되지 않을 때, 즉 응력을 받지 않았을 때의 Rf 저항값과 브리지의 각 성분 저항값은 같고, 각 검출브리지의 출력전압은 “0”이다.

2.1 x축 가속도측정

x축으로 가속도가 가해질 경우 그림 2에서 알 수 있듯이 저항 Rx1 과 Rx2 는 증가하는 반면, Rx3 과 Rx4 는 감소하고, 각 저항들의 저항값 변화의 절대값은 같다. 이 때 저항의 변화분이 ΔR_x 이라면 x축 검출브리지의 출력 V_x 는 식 1과 같다.

$$V_x = (1 + \frac{\Delta R_x}{R}) V_s \tag{1}$$

여기서 V_s 는 브리지조합 회로에 인가된 입력전압이고, R 은 응력을 받지 않았을 때 브리지 저항의 저항값이다. 그러나 y축 검출브리지를 구성하는 저항성분인 Ry1 와 Ry3 는 증가하고 Ry2 와 Ry4 는 감소하므로, y축 검출브리지의 출력 V_y 에는 출력값이 검출되지 않는다. 그리고 z축 검출브리지의 출력에 기여하는 x축 검출브리지 양단저항 $R_{\oplus\oplus}$ 와 y축 검출브리지의 양단저항 $R_{\oplus\ominus}$ 의 저항값 변화가 서로 상쇄되므로 z축 검출브리지의 출력 V_z 에도 출력성분이 검출되지 않는다.

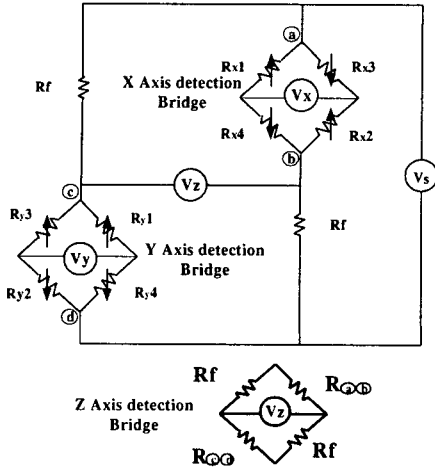


그림 2. x 축 가속도 검출 원리
Fig. 2. Detection principles of x-axis acceleration.

2.2 y축 가속도측정

x축 검출원리와 마찬가지로 y축으로 가속도가 가해졌을 경우, 그림 3과 같이 y축 검출브리지를 구성하는 저항 Ry1과 Ry2는 증가하고, Ry3와 Ry4는 감소를 한다. 그러나 각 저항들의 저항값 변화의 절대값은 같다. 이 때 저항의 변화분이 ΔR_y 이라면 y축 검출브리지의 출력 V_y 는 다음과 같다.

$$V_y = \left(1 + \frac{\Delta R_y}{R}\right) V_s \quad (2)$$

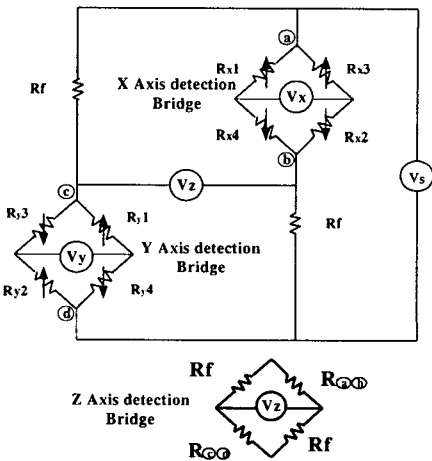


그림 3. y 축 가속도 검출 원리
Fig. 3. Detection principles of y-axis acceleration.

그러나 x축 검출브리지를 구성하는 저항 Rx1과 Rx3는 증가하고 Rx2와 Rx4는 감소하여 V_x 에는 출력값이 검출되지 않는다. 이 때 z축 검출브리지의 출력에 기여하는 x축 검출브리지 양단저항 R_{aB} 과 y축 브리지의 양단저항 R_{cD} 는 저항 값이 서로 상쇄가 되어 V_z 에도 출력성분이 검출되지 않는다.

2.3 z축 가속도측정

z축으로 가속도가 가해질 경우는 R_f 를 제외한 전 저항 성분이 양의 변화 값을 가지게 되며 그 크기는 모두 같다. 그러므로 x 및 y축 검출브리지의 출력 V_x 와 V_y 에는 저항값 변화에 따른 출력의 변화는 없다. 그러나 그림 4에서 알 수 있듯이 x축 검출브리지의 양단저항 R_{aB} 과 y축 검출브리지의 양단저항 R_{cD} 의 저항값은 증가하여, z축 검출브리지의 출력 V_z 는 식 3과 같다.

$$V_z = \left[\left(\frac{R + \Delta R_z}{2R + \Delta R_z} \right) - \left(\frac{R}{2R + \Delta R_z} \right) \right] V_s \quad (3)$$

여기서 ΔR_z 는 z축 방향으로 가속도 인가시 저항값의 변화분이다. 그러므로 가속도 인가에 따른 출력의 변화를 얻게되어 가속도가 검출 된다.

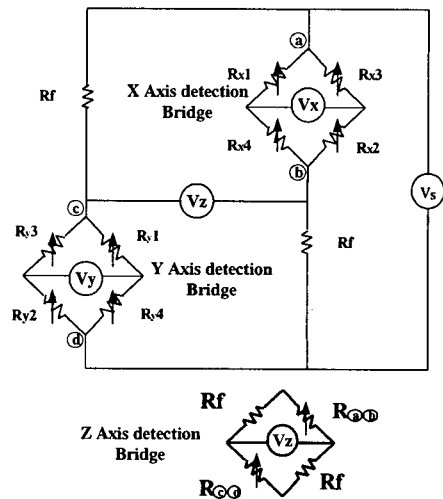


그림 4. z 축 가속도 검출 원리
Fig. 4. Detection principles of z-axis acceleration.

3. 센서의 설계 및 제작

그림 5는 제작된 브리지조합 검출방식의 3축 가속도 센서의 구조이다. 빔의 두께는 응력변화에 따른 저항값 변화에 가장 크게 미치는 파라미터이므로 가능한 한 얇은 것이 좋으나 공정능력을 고려하여 15 μm 로 설계하였다. 그리고 빔의 폭도 가속도센서의 감도를 결정하는 파라미터 중 하나로 가능한 작게하므로 감도를 높일 수 있다. 그러나 압저항을 형성하기 위한 폭과 배선 및 얼라인먼트시 오차를 고려하여 300 μm 로 설계를 하였다. 빔의 두께와 폭이 결정되면 나머지 파라미터는 빔의 길이이다. 빔의 길이가 정해지면 질량부의 크기가 정해지기 때문에 센서의 감도가 결정된다.

가속도감도는 결정하기 위해서는 동시에 공진주파수를 고려하는 것이 필요하다. 공진주파수는 센서의 용도에 의해 달라지는데 일반적으로 빠른 응답성이 요구되는 자동차의 에어백용 가속도센서의 경우 수 kHz 정도의 공진주파수가 요구된다. 본 센서는 3차원 가속도벡터 성분 검출이 가능한 센서로, 이를 이용한 자세제어 등의 용도에 사용하기 위해서는 주파수대역은 1kHz 정도가 요구된다. 그러므로 센서의 공진주파수를 최소 1.5kHz 정도가 되게 유한요소법(finite element method: FEM)^[7]을 이용한 설계를 하여 센서 각부의 크기를 결정하였다. 표 2는 유한요소법을 이용하여 설계된 센서 각부의 크기이다.

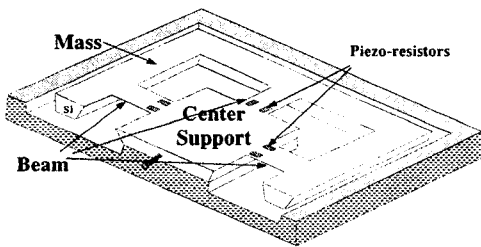


그림 5. 3축 가속도센서의 구조
Fig. 5. The structure of three axis accelerometer.

표 2. 가속도센서의 설계 파라미터
Table 2. Design parameters of the accelerometer

Sensor Chip size	Support width	Beam thickness	Beam width	Beam length
5000 μm × 5000 μm	2000 μm	15 μm	300 μm	700 μm

그림 6은 센서제작 공정도이다. 사용된 기판은 SDB 기술로 제조된 SOI 웨이퍼(소자층의 두께가 1.5 μm , 절연산화층 0.5 μm)이다.

먼저 기판 실리콘의 두께를 250 μm 로 하여, 표면 불순물 농도가 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-2}$ 가 되게 하였다. 그리고 소자층을 식각하여 섬모양의 압저항을 형성한다. 그리고 식각 정지용 V-groove 홈을 만들고, 양면에 산화와 질화막을 형성시켰다. 그리고 기판 측의 산화막과 질화막을 제거한 후, 질량부 및 지지대를 형성하기 위해 산화를 하여 습식식각을 하였다. 이때 V-groove용 홀이 관통되는 시점에서 식각을 중단한다. 질량부를 형성하기 위한 실리콘의 식각은 (212)면으로의 과도 식각을 방지하기 위해 주로 보상마스크를 이용한다.^[8] 본 제작에서는 보상마스크의 크기는 177 μm 로 실험을 통하여 보상마스크와 식각마스크와의 간격이 최소 50 μm 정도에서 식각 중단없이 무난히 식각되는 것을 확인하였다. 이를 이용하면 보다 큰 질량부를 형성할 수 있는데, 그림 7(a) 식각된 질량부와 지지대의 사진으로 질량부의 체적이 약 10% 정도 증가하였다. 그리고 SD3 glass를 패터닝하여 질량부의 가동범위를 식각깊이로 제어한 후 실리콘 기판과 가공된 SD3 glass를 양극접합을 하고 contact 홀 및 Al 배선을 하였다. 그리고 RIE를 통해서 빔을 형성한다. 그림 7(b)는 제작된 센서의 사진이다.

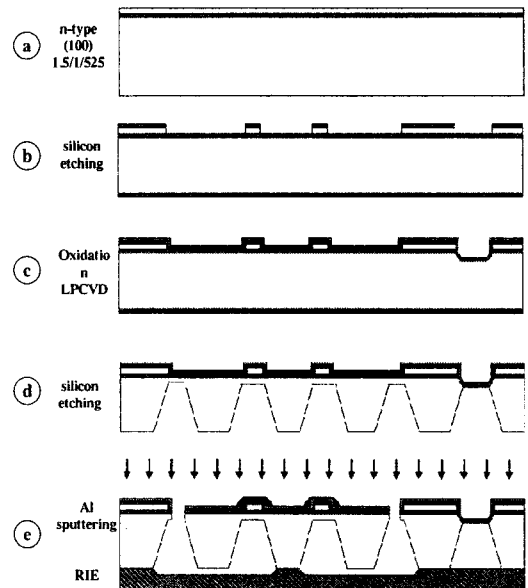
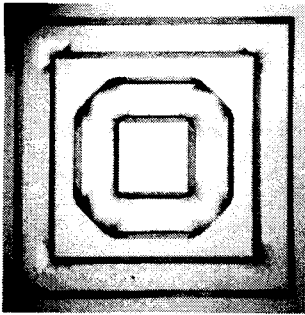
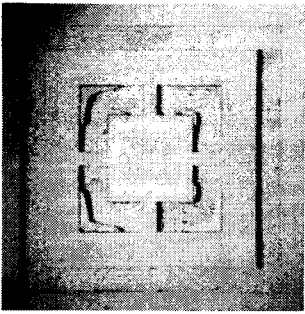


그림 6. 제작 공정도
Fig. 6. Fabrication process.



(a) Below view of the accelerometer

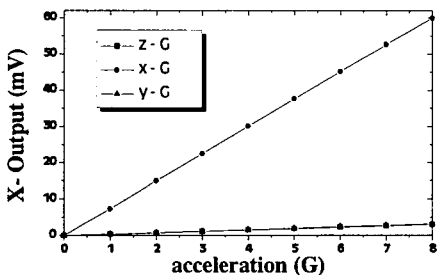


(b) Top view of the accelerometer

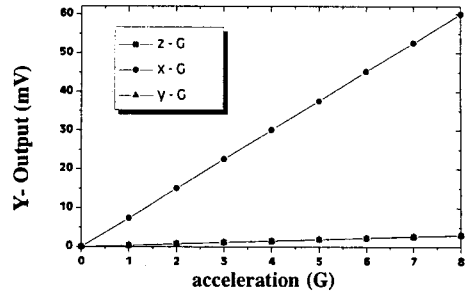
그림 7. 제작된 가속도센서의 윗면과 밑면 사진
Fig. 7. Top and bottom view of fabricated accelerometer.

4. 결과 및 고찰

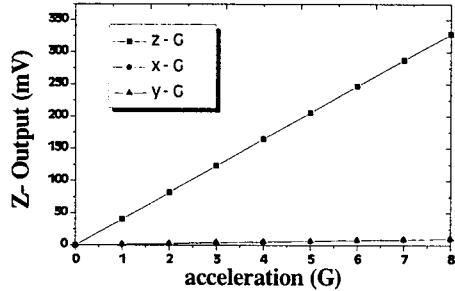
그림 8은 브리지조합 검출방식을 이용하여 제작된 가속도센서의 감도특성을 나타낸 것이다. x축 및 y축의 감도는 $8\text{mV/V}\cdot\text{G}$, z축의 감도는 $40\text{mV/V}\cdot\text{G}$ 이다. 그리고 타측감도는 약 4.6%, 출력전압의 최대 비선형성은 full scale 출력에서 약 1.6FS%였다. 이와 같은 특성은 연산회로를 이용하여 3축의 가속도성분을 측정하는 방법¹⁾들과 거의 동일하다.



(a)x-Axis output



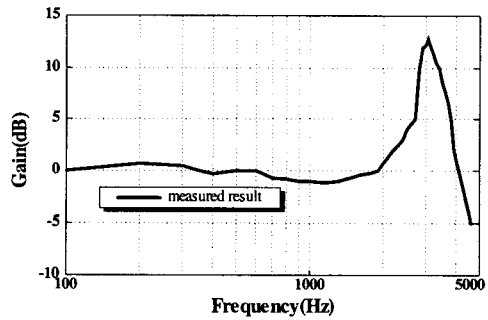
(b)y-Axis output



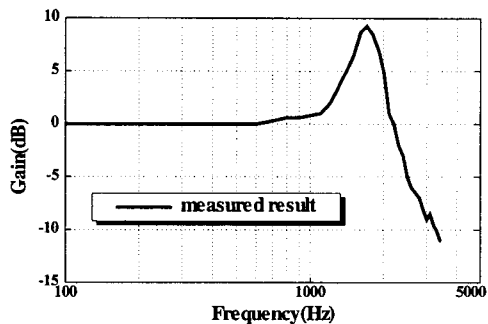
(c)z-Axis output

그림 8. 가속도센서의 출력특성

Fig. 8. Out characteristics of the Accelerometer.



(a) z Axis



(b) x(y) Axis

그림 9. 가속도센서의 주파수 응답특성

Fig. 9. Frequency response of the accelerometer.

그리고 진동주파수를 100Hz에서 5000Hz까지 변화시켰을 때의 주파수 응답특성을 그림 9에서 나타내었다. 그림(a)는 z축에서 가속도를 인가할 때의 응답특성으로 z축의 공진주파수는 3098Hz이고, 그림(b)는 x(y)축으로 가속도를 인가할 때의 주파수응답특성으로 공진주파수는 1786Hz이었다.

그림 10은 제작된 가속도센서의 고온특성을 알아보기 위해, 온도변화에 따른 오프셋전압과 감도를 측정한 결과이다. 본 센서의 오프셋전압은 온도가 증가함에 따라 오프셋전압의 절대치가 증가하고 있으나, 200°C 이상의 온도에서도 급격한 변화는 없다. 이것은 압저항이 산화막으로 유전체 분리되어 소자로 부터의 누설전류가 발생하지 않음을 알 수 있다. 그리고 발생한 오프셋전압은 검출저항과 기준저항간의 열응력 차와 불순물 농도 차에 의한 온도계수의 차가 원인이다.^[9] 또 그 값이 일반 압저항브리지 구조의 센서와 비교해 볼 때 크지 않음을 알 수 있다. 제작된 가속도센서의 오프셋전압의 온도계수(TCO)는 27°C에서 1033ppm°C⁻¹ 이었다.

감도의 온도특성에서 감도의 온도계수(TCS)는 양의 값인 압저항의 저항온도계수와 음의 값인 압저항계수 π_{44} 의 온도계수 그리고 가속도에 의해 발생하는 응력의 온도계수의 합으로 이루어진다. 그러나 통상적으로 응력의 온도계수는 작아서 감도의 온도계수는 저항온도계수와 압저항계수의 온도계수의 합이다.^[9] 감도의 온도특성은 80°C 까지는 서서히 증가하다, 그 이후부터는 감소를 하였다. 이것은 열 여기된 진성캐리어의 급속한 증가로 인해, 압저항계수의 온도계수가 큰 음의 값으로 변화하는 것을 알 수 있다. 그러나 감도의 온도 특성도 소자가 유전체 분리되어 200°C 이상 고온에서 급격한 변화는 없었다. 그리고 제작된 센서의 감도의 온도계수는 27°C에서 1145ppm°C⁻¹ 이었다.

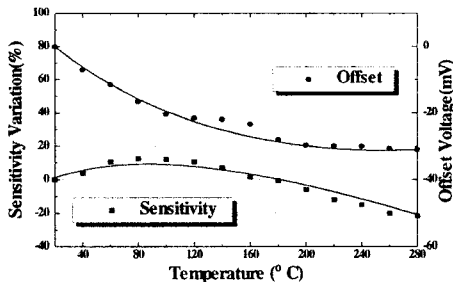


그림 10. 가속도센서의 온도특성
Fig. 10. Temperature characteristics of the accelerometer.

5. 결론

본 연구에서는 브리지 조합을 통하여 하나의 센서소자로 3축의 가속도를 검출할 수 있는 새로운 방식의 가속도센서 검출 방식을 제안하였다. 기존의 검출방식은 출력성분을 분리하여 검출하기 위해 외부에 복잡한 연산회로가 다수 필요하므로 동작 불안정화의 원인이 된다. 그에 비해 브리지조합 방식은 외부회로 없이 센서출력을 간단하게 검출할 수 있어 그 유용성이 크다고 하겠다. 제작된 가속도센서의 출력특성은 x축 및 y축의 감도가 8mV/V·G, z축의 감도는 40mV/V·G였다. 그리고 타측감도는 약 4.6%, 출력전압의 최대 비선형성은 1.6FS%였다.

오프셋전압의 온도특성은 SOI 구조에 의한 검출소자의 유전체 분리로 누설전류를 제거하여, 급격한 변화를 보이지 않았고, 고온에서 안정성을 보였다. 그리고 감도의 온도특성도 200°C 이상의 고온에서도 안정하게 동작함을 확인하였다.

본 연구에서 제작된 센서를 이용하면 200°C 이상의 고온 환경하에서 사용되어야 하고, 자동차의 전후, 좌우 및 상하의 가속도를 동시에 측정하기 위한 자동 능동제어 현가장치의 전용센서로 실용화 될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단에서 지원한 핵심전문연구(KOSEF 961-0918-084-2)의 것이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] P.Kleinschmit and F.Schmidt, "How many sensors does a car need", Sensors and Actuators, A 31,PP.34-45,1992.
- [2] K.Okada, "Flat-Type Six-Axial Force-Sensor", Technical Digest of the 9th Sensor Symposium, pp.245-248, 1990.
- [3] K.Okada, "Tri-Axial Piezoresistive Accelerometer" Tech Dig. pp.245-248, 1992.
- [4] H.Takao, Y.Matsumoto, H.Tanaka, H.Seo, M.Ishida and T.Nakamura,"Three Dimensional Vector Accelerometer Using SOI Structure for

- High Temperature", Electronics and Communication in Japan, Part2, Vol.79, No.3, pp.495-505,1996.
- [5] Y.T.Lee, H.D.Seo, M.Ishida, S.Kawahito and T.Nakamura. "High temperature pressure sensor using double SOI structure with two Al₂O₃ film", Sensor and Actuators. A 43, PP.59-64, 1994.
- [6] H. Takao, Y. Matsumoto, H.D. Seo, M. Ishida and T. Nakamura, "Three Dimensional Vector Accelerometer Using SOI Structure for High Temperature", Tranducers'95, Stockholm, Sweden, pp.683-686, 1995.
- [7] T. Tchan, N. de Rooji, and A. Bezinge, "Analytical and FEM modeling of piezoresistive silicon accelerometer",Sensors and Materials, vol.3, no. 4, pp.189-203, 1992.
- [8] Xian Ping Wu, Wen H.Ko, "Compensating corner undercutting in anisotropic etching of (100) silicon", Sensor and Actuator, Vol.18, pp.207-215, 1989.
- [9] 손미정, 서희돈, "SOI 구조 가속도센서의 온도특성 해석", 한국센서학회논문지, 제 9권, 1호, PP.1-8, 2000.

著 者 紹 介

손 미 정 (孫美正)

『센서학회지 제9권 제1호』 논문2000-9-1-01 p.1 참조
현재 영남대학교 전자공학과 박사과정

서 희 돈 (徐熙敦)

『센서학회지 제5권 제1호』 논문95-5-1-07 p.43 참조
현재 영남대학교 전기전자공학부 교수