

고온용 3차원 실리콘 가속도센서

손 미정, 서 희돈
 영남대학교 전기전자공학부

Three Dimensional Silicon Accelerometer for High Temperature Range

Mi-Jung Son and Hee-Dón Seo
 School of Electrical & Electronics Engineering, Yeungnam University

Abstract - In this paper, we propose the new detecting method for three dimensional piezoresistive silicon accelerometer. Furthermore the accelerometer is formed to have endurance for high temperature by perfect isolation of the piezoresistors using Silicon On Insulator(SOI) wafer. Sensor size are optimized with analytical formulae and extended with FEM simulation for the more detailed results. The accelerometer was fabricated by bulk micromachining technology. We measured the temperature characteristics and the output characteristics, and the both characteristics were compared with the simulated results

여기서 π_{44} 는 압저항계수이고, σ_L 과 σ_T 는 각각 저항의 전류방향의 응력성분 및 이에 수직하는 방향의 응력 성분이다.

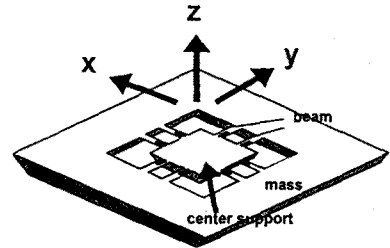


그림 1. 센서의 구조와 압저항 배치도.

1. 서 론

최근 실리콘 마이크로머시닝기술과 IC제조기술의 발달로 여러 가지 구조, 검출원리 및 주변회로를 집적화하는 등 실리콘 가속도센서의 실용화를 위한 연구가 이루어지고 있다. 그러나 압저항의 pn접합에 의한 누설전류 때문에 동작온도의 범위는 $-50^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 로 제한되어 있다. 동작범위를 넓히기 위한 간단한 방법은 가속도센서의 제작에 Silicon on Insulator(SOI)구조를 이용하여 압저항소자가 실리콘 산화층에 의해 완전히 분리가 되게 하는 것이다.^(1,2) 그리고 가속도는 벡터량이기 때문에 3축의 성분으로 되어 있다. 종래는 한축의 가속도를 측정하는 것을 목표로 하여 3축 방향 가속도를 측정하고자 할 때는 센서소자를 3개 조합해야 한다. 그러나 상업적인 면에서 생각한다면 센서구조 및 신호처리회로가 간단한 것이 바람직하다. 그러므로 본 연구에서는 하나의 센서소자로 3축 방향의 성분을 측정할 수 있는 새로운 방법을 제안하여 고온용 가속도센서를 제작한다.

그림 2는 센서에 가속도가 가해질 경우, 3축의 출력을 검출하기 위한 압저항 배치도로서, x축 검출 브리지와 y축 검출 브리지, 그리고 x,y축 검출 브리지 양단의 전압의 변화로서 z축의 가속도를 검출하는 z축 검출 브리지로 구성된다. 먼저 그림 2(a)에서 보는 것과 같이 x축의 가속도가 인가시, R_1, R_2, R_7, R_8 의 저항은 양의 저항의 변화를 가지고 R_3, R_4, R_5, R_6 는 음의 저항의 변화를 가진다. 그림에서 알 수 있듯이 x축 검출 브리지의 출력은 변화로 갖게 되고, x축 방향의 가속도성분을 구할 수 있다.

2. 본 론

2.1 가속도 검출원리 와 구조해석

그림 1은 본 연구에서 설계한 센서의 구조이다. 이 구조의 특징은 중앙지지 구조로 종래의 주변지지 구조보다 진동 mass의 체적 비율이 높기 때문에 고 감도를 얻을 수 있으며 package 재료와 센서 구조에 의한 열응력을 줄일 수 있다.⁽³⁾ 그리고 3축의 가속도를 검출하기 위하여 8개의 빔 위에 압저항이 각각 하나씩 배치하여, 압저항의 저항변화를 통하여 가속도를 검출할 수 있게 설계하였다.

일반적으로 (100)웨이퍼상의 <110> 방향으로 형성된 p형 압저항은 인가한 응력에 의해 저항값 R은 다음과 같이 변화한다.

$$\Delta R \approx \frac{1}{2} \pi_{44}(\sigma_L - \sigma_T)R = \frac{1}{2} \pi_{44}\sigma R \quad (1)$$

$$V_{outx} = \frac{1}{2} \pi_{44}RI\sigma_x \quad (2)$$

여기서 σ_x 는 x축 가속도성분 검출 브리지를 구성하는 저항의 응력성분이다. 이때 y축 검출 브리지 출력은 R_2 와 R_7, R_6 와 R_3 가 각각 대칭적으로 증가, 감소하므로 "0"이 되고 x축과, y축 검출 브리지 양단의 저항변화를 합산하면 "0"이 되어 z축의 가속도성분도 "0"가 된다. 마찬가지로 y축의 가속도가 가해질 때는 그림 2(b)에서 보는바와 같이 x축과는 반대로 저항 R_5, R_6, R_7, R_8 는 증가하고 R_1, R_2, R_3, R_4 은 감소하여 y축 검출 브리지의 출력을 x축 검출과 동일한 방법으로 검출할 수 있다.

가속도가 그림2(c)와 같이 z축 방향으로 가해질 때 R_{ref} 를 제외한 모든 저항 ($R_1 \sim R_8$)은 양의 저항의 변화를 갖게 되고, 저항의 변화는 x축과, y축 검출 브리지 양단의 저항을 증가시켜서 z축의 가속도를 검출할 수 있다. 이 때 x,y축 검출 브리지의 출력은 변화가 없다.

z축으로 가속도가 가해졌을 때, z축 검출 브리지를 통한 z축 방향의 가속도 성분은 다음식과 같다.

$$V_{outz} = \frac{1}{2} \pi_{44}RI\sigma_z \quad (3)$$

여기서 σ_z 는 z축의 가속도에 의한 압저항의 응력을 나타내고 있다.

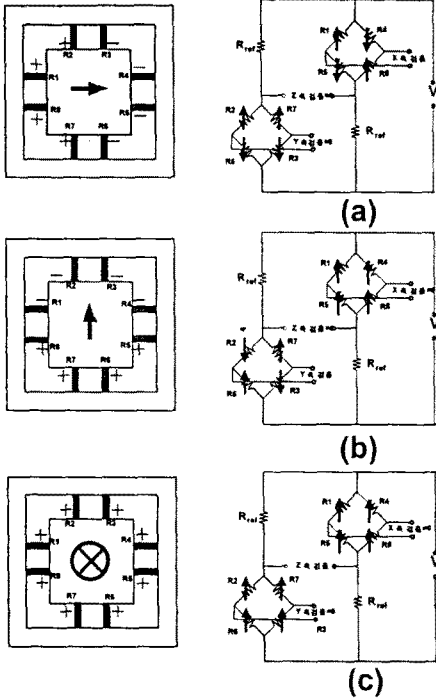
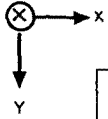


그림 2. 가속도 검출원리도.

그림3과 같은 같은 구조의 센서에 z 축으로부터 가속도가 가해질 때, 진동 mass는 상하 운동을 하고, x축과 y 축으로 가속도가 가해질 때는 회전 모멘트에 의해 비틀림을 가진다.

먼저 센서에 z 축으로부터 가속도가 가해질 때 가속도에 의한 진동 mass의 변위는 뉴턴의 운동 제2법칙 $F_z = -Ma_z$ 로 나타난다. 여기서 a_z 는 z축으로 가해진 가속도이고 M은 진동 mass의 중량으로, mass의 구조와 물질의 밀도에 의해 결정된다. 진동의 중량은 다음 식으로 나타난다.

$$M = \int_{z=0}^{t_{wafer}} \int_{y=-\frac{a_1}{2} + \frac{(a_1-a_2)z}{2t_{wafer}}}^{\frac{a_1}{2} - \frac{(a_1-a_2)z}{2t_{wafer}}} \int_{x=-\frac{b_1}{2} + \frac{(b_1-b_2)z}{2t_{wafer}}}^{\frac{b_1}{2} - \frac{(b_1-b_2)z}{2t_{wafer}}} \rho dx dy dz - \int_{z=0}^{t_{wafer}} \int_{y=-\frac{b_1}{2} + \frac{(b_1-b_2)z}{2t_{wafer}}}^{\frac{b_1}{2} - \frac{(b_1-b_2)z}{2t_{wafer}}} \int_{x=-\frac{b_1}{2} + \frac{(b_1-b_2)z}{2t_{wafer}}}^{\frac{b_1}{2} - \frac{(b_1-b_2)z}{2t_{wafer}}} \rho dx dy dz$$

$$= \rho \frac{t_{wafer}}{3} (a_1^2 + a_1 a_2 + a_2^2 - b_1^2 - b_1 b_2 - b_2^2) \quad (4)$$

여기서 ρ 는 물질의 밀도 ($\rho_{Si} = 2.33 \cdot 10^3 \text{ kgm}^{-3}$)이다. 그리고 진동 mass의 변위 Δz 는 mass에 작용하는 모든 힘을 합산하여, 다음 식으로 나타낼 수 있다.⁽⁵⁾

$$\Delta z = \frac{l_b^3}{96EI_y} Ma_z = \frac{-Ma_z}{K_z} \quad (5)$$

여기서 E는 young's modulus 이고, I_y 는 2차 면적

모멘텀으로서 빔의 단면적에 의해 결정된다.

$$I_y = \int_{x=-\frac{w_1}{2}}^{\frac{w_1}{2}} \int_{z=-\frac{h_1}{2}}^{\frac{h_1}{2}} z^2 dz dx = \frac{w_1 h_1^3}{12} \quad (6)$$

그리고 K_z 는 스프링 상수이다.

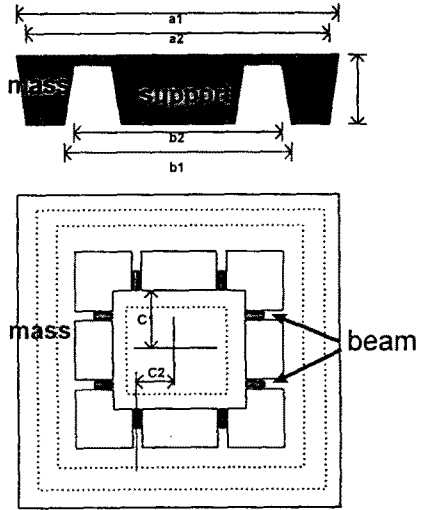


그림 3. 가속도센서 구조 개략도.

가속도가 x축과 y 축으로 가해질 때는 mass에는 회전 모멘트 ($M_{lateral}$)가 발생하고, 식(7)과 같이 주어진다.

$$M_{lateral} = F_{lateral} Z_c = -Ma_{lateral} Z_c \quad (7)$$

여기서 Z_c 는 mass의 중심의 z축 성분이고, mass의 구조에 의해 결정되며 다음 식으로 표현된다.

$$Z_c = \frac{\int \int \int_{mass}^{total} \rho z dx dy dz - \int \int \int_{mass}^{iner} \rho dx dy dz}{\int \int \int_{mass}^{total} \rho z dx dy dz - \int \int \int_{mass}^{iner} \rho z dx dy dz}$$

$$= \frac{t(a_1^2 + 2a_1 a_2 + 3a_2^2 - b_1^2 - 2b_1 b_2 - 3b_2^2)}{4(a_1^2 + a_1 a_2 + a_2^2 - b_1^2 - b_1 b_2 - b_2^2)} \quad (8)$$

여기서 x,y축의 가속도에 의한 회전각은 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_{x(y)} = \frac{-Z_c l_b^3}{16EI_{x(y)} (l_b^2 c_1^2 + 3c_1^2 + 3c_2^2)} Ma_{x(y)}$$

$$= -\frac{Ma_{x(y)} Z_c}{K_{\theta_{x(y)}}} \quad (9)$$

여기서 K_{θ_x} , K_{θ_y} 는 회전운동에서의 스프링 상수이다.

위 식(5),(9)에서 알 수 있듯이, 감도를 결정하는 요소는 센서의 구조에 의해 결정되며, 여기서 빔의 위치 c_2 는 x축과 y축 가속도의 감도를 결정하는 중요한 요소가 된다. 식(9)에서 c_2 를 최소로 함으로서, 즉 빔의 위치를 지지대 중앙부로 위치시킴으로서 x축과 y축의 감도를 크게 할 수 있다.

공진주파수는 몇 개의 모드로 해석할 수 있는데 시스템의 고유치로서 결정된다. 진동 mass의 수직모드는 다음

식과 같다.

$$f_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_z}{M}} \quad (10)$$

그리고 수평모드는 x,y축의 회전모드로서 식(11)과 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$f_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\theta_x}}{I_{\theta_x}}} \quad \text{or} \quad f_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\theta_y}}{I_{\theta_y}}} \quad (11)$$

여기서 I_{θ_x} , I_{θ_y} 는 관성모멘트이고, 중량과 거리의 제곱의 합으로 나타낸다. 본 구조에서는 소자 전체의 관성모멘트에 소자의 중심에서 빔의 끝의 관성모멘트를 구한 다음, 그 결과를 대수적으로 합산하여 구한다. 수평모드에서는 stiffness(K_{θ_x} , K_{θ_y})와 관성모멘트는 서로 같기 때문에 공진주파수는 같은 값을 나타내고 있다. 위 식에서 수평모드의 공진주파수를 크게 하기 위해서는 stiffness를 크게 해야하는데, 이것은 x축과 y축 감도를 크게 하기 위해 빔의 위치를 중앙부로 위치시키는 것과는 반대로 지지대의 모서리 부근으로 빔을 위치 시킴으로서 공진주파수를 크게할 수 있다.

2.2 센서 설계 및 제작

센서의 감도를 결정하는 요인은 beam의 길이, mass의 질량 등이 있지만 그중에 beam의 두께는 압저항에 발생하는 응력이 가장 크게 미치는 설계 parameter이다. 그러므로 beam의 두께를 얇게하는 것이 바람직하지만 제작공정 능력과 실험에 사용된 SDB wafer를 이용하므로 beam의 두께를 25 μm 로 결정하였다.

수평방향의 parameter는 센서의 크기와 생산 cost에 직접 관계가 있다. 본 연구에서는 센서의 전체 크기를 5000 μm , 지지대의 폭을 2000 μm 로 하여 설계하였다. 센서의 전체 폭과 지지대의 폭이 정해지면 나머지 parameter는 beam의 길이이다. beam의 폭은 센서의 감도를 결정하는 중요한 parameter이나 alignment시 오차의 영향을 고려하여 300 μm 로 설계하였다. 그림4는 센서 전체크기를 5000 μm 으로 두고, beam의 길이를 증가했을 때의 z축의 deflection과 x,y축의 회전각이다. 그 결과 beam의 길이가 950 μm 일 때는 z축의 deflection이 최대이고 900 μm 일 때는 회전각이 최대임을 알 수 있다. 센서를 설계할 때는 최대의 감도를 검출하기 위한 센서구조를 설계하는 것이 바람직하다. 그러나 실제 센서를 제작하려 할 때 매스와 같은 mesa 구조를 형성하기 위해서는 이방성 에칭이 필요하고, 보상 pattern 등을 고려해야 하므로 beam의 길이를 800 μm 로 하였다.

그리고 x,y축 가속도에 의한 회전량에 대한 중요한 parameter가 beam의 위치 c2에 관한 것인데 앞 절에서 언급했듯이 beam의 위치 c2는 z축 방향의 가속도에 의한 deflection은 이론적으로는 관계가 없고, x,y축 방향의 회전량과 고유진동수에 영향을 미친다. 그림5는 beam의 위치(parameter c2)에 따른 회전각과 공진주파수이다. c2가 증가할수록 x,y 축에 대한 회전량은 감소하고, 공진주파수는 증가함을 알 수 있다. 본 연구에서는 c2의 길이를 200 μm 로 하였다.

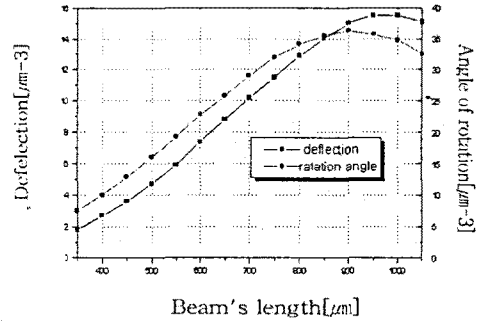


그림 4. 빔의 길이에 따른 z축 방향의 휨과 x,y축 방향의 회전각.

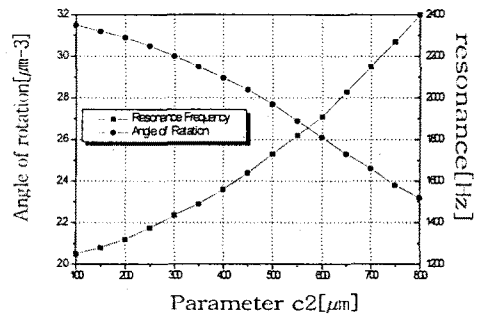


그림 5. 파라미터 c2에 따른 x,y축 방향의 회전각과 공진주파수.

그림6은 센서제작 공정도이다. 센서 제작에 사용된 기판은 SDB웨이퍼로 소자층 실리콘 두께가 1.5 μm , 절연산화층 0.5 μm , 기판의 실리콘 두께가 440 μm 으로 N-type 을 사용하였다. 먼저 (b) boron 확산을 통하여 소자층 실리콘에 불순물을 도핑한후, 산화막을 마스크로 하여 소자층을 식각하여 압저항을 형성한다. 그리고 (c) 식각정지방법으로 V-groove 기술을 이용하기 위해, 실리콘의 밑면에 Si_3N_4 를 LPCVD를 이용하여 1500 \AA 정도 박막을 형성한 다음 기판층 실리콘의 산화막과 Si_3N_4 을 patterning 하고 V-groove용 정방형 hole를 25 μm 식각한다. 이때 보호용 glass를 표면에 부착한다. (d) mass, 지지대등 mesa구조를 형성하기 위해 뒷면 실리콘을 식각한다. 이 때 이미 25 μm 식각된 V-groove 용 hole이 관통되는 관점에서 식각을 정지한다. 이 단계에서 센서는 25 μm 두께의 다이아프램으로 모두 연결되어 있다. 보호막을 제거한후 CVD SiO_2 를 통하여 기판 위에 보호막을 만든다. 또 SD2 glass를 patterning하여 mass의 가동범위를 식각 깊이로 제어한다.⁽⁴⁾ 그후 (e) 실리콘 기판과 가공된 SD2 glass를 Anodic bonding하여 접합을 하고 (f) glass와 접합된 상태에서 contact hole를 형성하여 Al을 증착후 patterning을 통해서 배선을 형성한다. 그리고 RIE를 통해 불필요한 실리콘 다이아프램 부분을 제거한다.

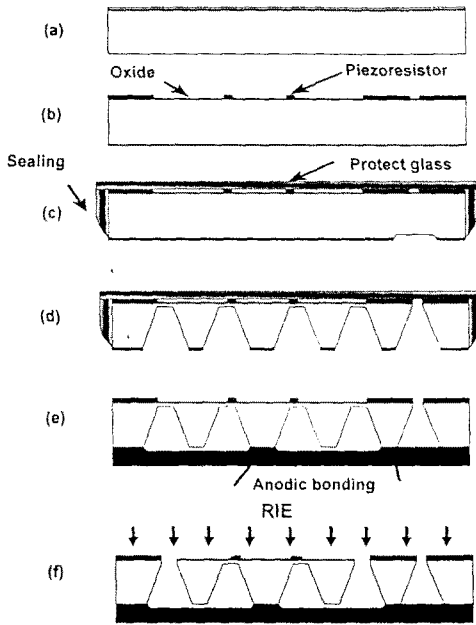


그림 6. 제작 공정도.

2.3 결과 및 고찰

그림 7은 pn접합형 센서와 SOI구조형 센서의 온도특성을 비교한 것이다. 그림에서 보는바와 같이 pn접합형의 오프셋전압은 pn접합상의 누설전류로 인해 200°C 이상에서 빠르게 증가함을 알 수 있고, 감도는 200°C 이상에서 빠르게 감소함을 알 수 있다. 그러나 SOI구조형 센서의 경우는 오프셋전압과 감도가 비교적 완만하게 400°C까지 유지함으로 알 수 있다.

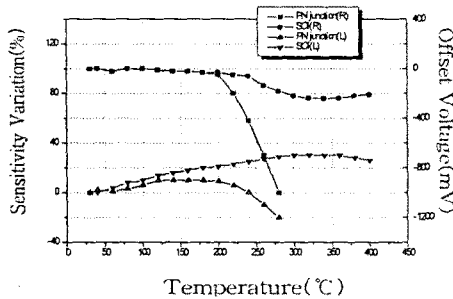
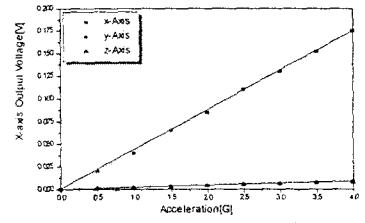


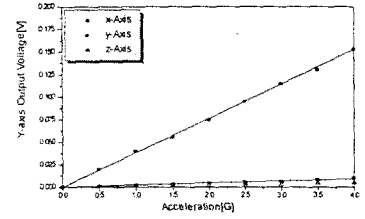
그림 7. 가속도센서의 온도특성.

그리고 본 연구의 목적은 하나의 소자로서 3축의 가속도를 검출하는 것이므로, 진동발생기에서 제작된 고정치구에 센서를 고정하고, 3성분 중 하나의 성분만을 갖는 가속도를 4G 까지 입력했다. 그림 8은 센서의 감도특성을 나타낸 것으로, x, y축의 감도는 16 μ m/VG, z축의 감도는 약 91 μ m/VG이다. 그리고 타축감도는 약 5.6%, 출력전압의 최대 비선형 특성은 full scale 출력에서 약 1.7%FS로 나타났다.

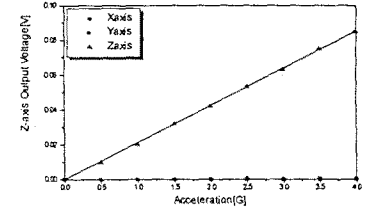
그림 9는 결정된 센서의 설계 파라미터를 가지고 FEM simulation 한 센서의 주파수 응답이다. x(y)축의 공진주파수는 1340Hz이고, z축 방향의 공진주파수는 2840Hz으로 z축방향의 공진주파수가 훨씬 높았다.



(a) x축 출력

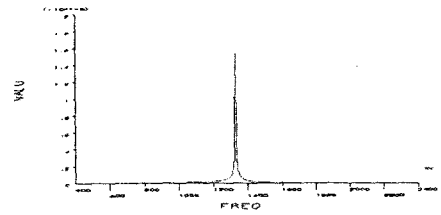


(b) y축 출력

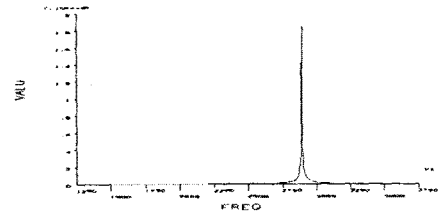


(c) z축 출력

그림 8. 센서의 출력특성.



(a)



(b)

(a) x(y) 방향(1340[Hz]), (b) z방향 (2840[Hz])

그림 9. 센서의 주파수 응답특성.

3. 결 론

본 연구에서는 SOI구조 wafer를 사용하여 고온에서 안정하게 가속도를 측정할 수 있는 센서를 IC 제조기술과 마이크로머시닝기술을 이용하여 제작하고, 하나의 센서소자로 3축의 가속도를 검출할 수 있는 방법을 제안하였다. 그리고 해석식과 FEM simulation을 통하여 제안된 센서의 구조해석을 하고 최적설계를 하였다. SOI 구조형 가속도센서는 압저항의 유전체분리에 의해 종래 pn접합형센서가 동작하지 않았던 200℃이상 400℃정도 고온에서 잘 동작함을 알 수 있었다. 센서의 감도는 x,y축, z축이 각각 16 μ m/VG, 약 91 μ m/VG이고, 타축 감도는 약 5.6%, 비선형특성은 full scale 출력에서 약 1.7%FS로 나타났다. 그리고 공진주파수 해석에서 x(y)축의 공진주파수는 1340Hz, z축 방향의 공진주파수는 2840Hz 이었다.

감사의 글

※ 본 연구는 한국과학재단에서 지원한 목적기초연구지원(KOSEF 61-0918-084-2)에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

(참 고 문 헌)

- [1] H. Takao, Y.Matsumoto,H.D. Seo, H. Tanaka, M.Ishida and T.Nakamura, "Three dimensional vector accelerometer using SOI structure for high temperature",Tech.Digest, 8th Int. Conf. Solid-State Sensor and Actuators,25-29,pp.683-686,1995
- [2] 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
- [3] K.Yamada, K.Higuchi, H.Tanigawa,"A novel silicon accelerometer with a surrounding mass structure", Sensors and Actuators,A.21-23,pp.308-311,1990
- [4] Y.Matsumoto, A.Okada, K.Kawai, H.Takao, H.D.Seo, T.Nakamura, "Etching method of glass and silicon for silicon accelerometer fabrication", Technical meeting on Sensor Technology, ST-94-6,pp.41-50,1994
- [5] Bulk-Micromachined Capacitive.Servo-Accelerometer, Delft Univ Press, pp.21-44,1995