

SOI 구조를 이용한 실리콘 압저항 가속도계의 설계 및 제작

양 의 혁 양 상 식* 한 상 우*
*아주대학교 제어계측공학과

Design and Fabrication of a Silicon Piezoresistive Accelerometer using SOI Structure

Yang Eui Hyeok Yang Sang Sik* Han Sang Woo*
*Dept. of Control and Instrumentation Engr. AJOU University

Abstract

In this paper, a silicon piezoresistive accelerometer of which the cantilevers have uniform thickness is designed and fabricated with SOI wafer. The accelerometer consists of a seismic mass and four cantilevers, and is fabricated mainly by the anisotropic etching method using EPW etchant. The fabrication processes are that of the frontside processes including the etching of the cantilevers and the doubleside alignment holes, the diffusion of the piezoresistors and patterning of the contact windows, and the metal connection process, and that of the backside processes including the etching of the shallow cavity and the seismic mass. Because of the uniformity of thickness, the performance of the accelerometer fabricated with SOI wafer is expected to be better than that of accelerometer fabricated by the time-controlled etching method.

1. 서론

최근 자동차 시스템의 전자화 추세에 맞추어, 안전성이 강조되는 자동차의 에어백 등의 부품에도 종래의 기계식 또는 전기식 센서에서 전자식 센서로의 전환이 이루어지고 있다. 전자식 센서로는 마이크로머시닝 기술로 제작되는 실리콘 센서에 대한 연구가 주종을 이루고 있다.

Roylance^[1]가 벌크 마이크로머시닝 기술을 이용한 실리콘 가속도계를 개발한 이후, 이에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다.^[2-4] 이와 함께 가속도계와 신호 처리부 및 온도 보상회로 등을 단일 칩 안에 집적화하는 연구가 이루어지고 있다.^[5-7] 실리콘 가속도계 중에서 용량형 가속도계는 온도 의존성이 낮은 장점이 있지만, 선형성이 매우 나쁘고 출력신호로 정전용량을 이용하기 때문에 신호처리에 어려움이 많다. 반면, 압저항형 가속도계는 선형성이 우수하며 신호처리가 비교적 쉬운 장점 때문에, 압저항 재료의 온도 의존성으로 인한 문제점에도 불구하고 이에 대한 연구가 계속적으로 증가되는 추세에 있다.

가속도계의 성능에 대한 기준은 크게 감도와 주파수 범위로 나눌 수 있다. 감도가 높은 가속도계의 제작시에는 외팔보 두께를 균일하게 조절하는 것이 중요하다. 외팔보 두께가 불균일할 경우 가속도에 대한 응답이 비선형적으로 나타나고 진동추의 하중이 외팔보의 어느 한 쪽으로 치우쳐 작용하게 되어 충격에도 약하게 된다. 외팔보를 이루는 다이아프램은 비등방성 식각

법으로 제작한다. 비등방성 식각법에 의한 두께 조절에는 시간의 조절에 의한 두께 조절법과 전기 화학적 식각법, 그리고 p-박막을 이용한 자동 식각 정지법을 들 수 있다. 첫번째 방법은 제조공정이 간단하고 대량생산공정에 적합하나, 식각시간만으로 조절을 하여야 하기 때문에 외팔보 두께를 정확히 조절하기가 힘들다. 두번째 방법은 가속도계 등의 실리콘 디바이스 제조에 가장 널리 쓰이는 방법이며 외팔보 두께 조절 및 p형 압저항 형성을 위한 n형 외팔보의 제조에 있어 효과적이거나, 앞면의 전극 형성 부분에 식각정지용 전위를 공급하는 금속박막의 증착이 어렵고, p-n 접합의 웨이퍼 모서리에서 누설전류가 발생할 가능성이 있으며, 웨이퍼 각각에 대하여 전위를 공급하여야 하기 때문에 대량생산공정으로의 응용이 어렵다. 세번째 방법은 고농도의 붕소 불순물과 격자간의 열팽창 계수의 불일치로 인한 잔류응력 증가현상 및 외부확산(out-diffusion) 현상, 그리고 p형 기판에 p형 압저항을 제조할 수 없는 등의 디바이스 구조상의 제약과 공정상의 제약으로 인하여 압저항형 센서의 제작에는 거의 응용되지 않고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위하여, SOI 구조를 가진 접합 실리콘 웨이퍼를 이용하여 가속도계의 주요 구성요소인 외팔보의 두께를 정확히 조절함으로써 감도와 선형성이 우수한 실리콘 압저항 가속도계를 설계하고 시험제작한다.

2. 구조설계

가속도계는 기본적으로 메사(mesa)형의 진동추(seismic mass)와 네 개의 외팔보를 갖는 형태로 구성된다. 가속도계의 이상적 감도를 S , 공진주파수를 f_0 이라 하면 다음과 같은 식으로 주어진다.^[8]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{3Ml^3}} \quad (1)$$

$$S = \frac{\Pi M l h \eta}{16I} \quad (2)$$

여기서 Π 는 압저항 계수(piezoresistance coefficient)이고, M 은 진동추의 질량, l 은 외팔보의 길이, b 와 h 는 각각 외팔보의 폭과 두께를 나타낸다. 또, E 는 영률(Young's modulus)를 나타내고, η 는 실제 디바이스의 구조를 고려한 상수이며 여기서의 값은 0.4이다. 압저항의 온도 의존성을 줄이기 위하여 붕소 표

면 농도가 약 $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 가 되도록 설계하며, 이 때의 압저항 계수는 약 $4.7 \times 10^{11} \text{cm}^2/\text{dyne}$ 이 계산된다.^[9] 저주파용 가속도계를 위하여 $M = 15 \times 10^{-6} \text{kg}$, $l = 400 \times 10^{-6} \text{m}$, $b = 260 \times 10^{-6} \text{m}$, $h = 10 \times 10^{-6} \text{m}$ 로 정하였다. 식 (1)과 (2)에 대입하여 계산하면 이상적 감도, S_0 는 약 0.2mV/Vg 이고 공진주파수 f_0 는 2.3kHz 이며, 주파수 범위는 약 1kHz 이다. 그림 1은 SOI 가속도계의 구조를 나타낸다. 네 개의 외팔보는 buried oxide층에 의하여 나머지 부분과 분리된다.

3. 디바이스의 제작

본 가속도계 제작에는 비저항이 $5 \sim 8 \Omega \text{cm}$ 이고, 두께가 $520 \pm 15 \mu\text{m}$ 인 직경 4 inch인 n형 기판에 $2 \mu\text{m}$ 의 산화막과 $10 \mu\text{m}$ 의 n형 실리콘이 형성되어 있는 SOI wafer를 사용한다. 제조공정은 외팔보 제작을 위한 얇은 식각 및 앞면 정합을 위한 정합 구멍의 식각공정, 압저항 확산공정 및 접촉창 형성공정, 금속배선공정 등의 앞면공정과 진동추가 진동할 때 필요한 얇은 공동(cavity)의 형성을 위한 식각공정과 진동추 형성을 위한 깊은 식각공정 등의 뒷면공정으로 이루어진다. 식각액은 Ethylenediamine, Pyrocatechol, DI water를 $250 \text{ml} : 40 \text{g} : 80 \text{ml}$ 의 비율로 혼합한 EPW 용액을 사용한다. 식각률은 식각 창(window)의 크기에 따라 약간씩 달라지는데, 1mm 이하의 창일 경우 115°C 에서 약 $1.0 \mu\text{m}/\text{min}$ 의 식각률을 보인다.

그림 2는 SOI 구조를 갖는 압저항 가속도계의 제작공정 순서도이다. 초기 산화막을 1000°C 에서 120분간 성장시켰으며, 이 때 산화막 두께는 약 $0.55 \mu\text{m}$ 이다. 첫번째 마스크를 이용하여

외팔보 식각을 위한 윈도우를 열고, T1을 식각한다. 이 공정에서, 정합구멍이 식각될 부분의 T1도 함께 식각된다. 이 공정은 산화막 위에 있는 $10 \mu\text{m}$ 두께의 실리콘을 식각하므로 EPW 용액을 이용한 정밀한 식각률 조절이 필요없기 때문에 HF : HNO_3 : $\text{CH}_3\text{COOH} = 9 \text{ml} : 75 \text{ml} : 30 \text{ml}$ 로 혼합한 용액을 이용한다. 실리콘 식각률은 약 $4 \mu\text{m}/\text{min}$ 이다. 식각 후 남은 산화막을 제거하고 1000°C 에서 120분간 산화막을 성장시킨다. 사진식각공정을 통하여 T2의 산화막(buried oxide)을 제거한 후 EPW 식각액으로 정합구멍을 식각한다. 식각 후 남은 산화막을 제거하고 다시 1000°C 에서 30분간 산화막을 성장시킨다. 정합구멍을 이용하여 양면을 정합한 후 진동추의 진동을 위한 공동의 패턴을 형성하고 EPW 용액을 이용하여 $20 \mu\text{m}$ 를 시간 조절법으로 식각한다. EPW 용액은 산화막에 대한 식각률이 매우 낮기 때문에 자연 산화막의 영향으로 인하여 시편을 식각액에 넣은 후 약 4분 이상 경과된 후부터 식각이 이루어진다. 식각이 이루어지면서 시편 표면으로부터 기포가 발생하기 시작하는데, 이 때부터 식각시간을 측정한다. 압저항은 BNI100 고체 확산원을 이용하여 1000°C 에서 30분간의 선풍산 후 BSG를 제거하고 1000°C 에서 30분간 후 확산함으로써 제작한다. 접촉창을 위한 사진식각공정 후 열진

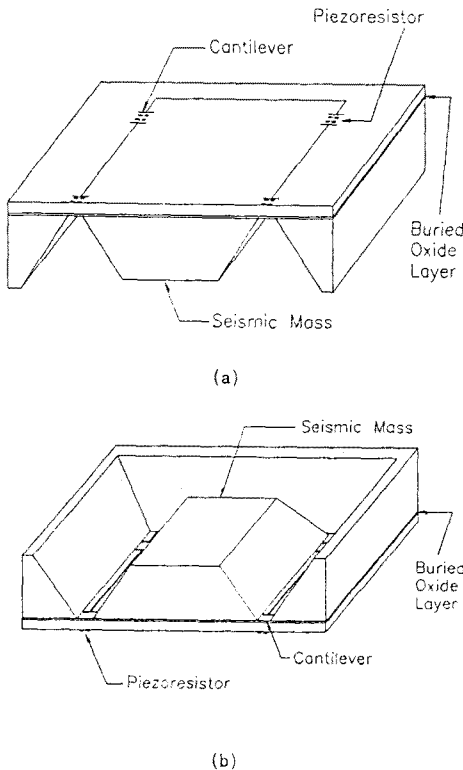


그림 1 SOI 가속도계의 구조 (a) 앞면 (b) 뒷면
Fig. 1 Structure of the SOI accelerometer
(a) Backside (b) Frontside

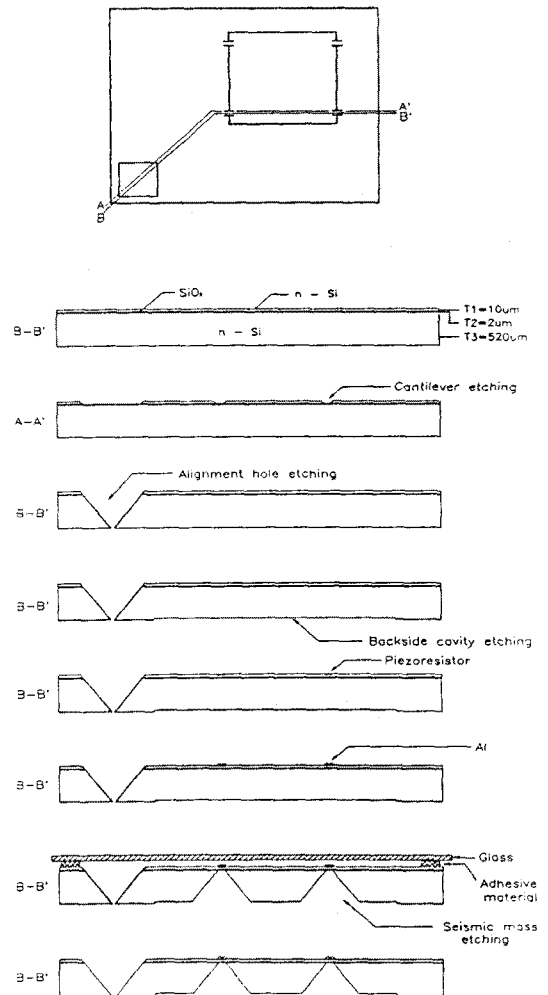


그림 2 SOI 가속도계의 제작공정
Fig. 2 Fabrication process of the SOI accelerometer

공 증착기를 이용하여 알루미늄을 증착하고 각 확산저항들이 브리지형으로 연결되도록 금속공정을 행한다. 알루미늄 패턴을 형성시킨 후 Al-Si 계면의 접촉저항을 줄이기 위하여 400°C에서 10분간 Alloy한다. 앞면의 공정을 마치고 뒷면의 진동추를 식각한다. 이 때 앞면 회로부의 보호를 위하여 시편을 adhesive material과 유리를 이용하여 밀봉한 후 식각공정을 행한다. 이 식각공정에서 EPW 용액의 식각률은 약 0.95 $\mu\text{m}/\text{min}$ 이므로 520 μm 의 실리콘 식각에는 약 9시간이 소요된다. 진동추는 mesa 형태이므로 진동추 제작시 하부부식을 방지하기 위하여 (212) 면의 식각률을 고려한 보상 마스크를 사용한다. 하부 부식률이 달라지면 원하는 모양을 얻을 수 없고 센서의 감도에도 악영향을 미치게 되므로, 식각시 용액의 조성비 변화를 억제하고 온도의 변동을 감소시키기 위하여 교반기, 피흐름기 및 온도 조절기 등을 이용하여 식각한다. 식각공정이 완료되면 $\text{NH}_4\text{F} : \text{HF} = 6 : 1$ 의 용액에서 10분간 T2 부분의 산화막을 1 μm 가량 식각한 후, 알루미늄을 보호하기 위하여 $\text{H}_2\text{O} : \text{CH}_3\text{COOH} : \text{NH}_4\text{F} = 6 : 5 : 1$ 의 용액으로 T2의 남은 산화막을 제거한다. T2의 산화막이 제거되면 ultrasonic을 이용하여 밀봉에 사용된 adhesive material과 유리판을 제거한다. 그림 3은 제작된 SOI 가속도계의 뒷면 SEM 사진이고, 그림 4는 외팔보의 단면을 3000배 확대한 SEM 사진이다. 사진으로부터 진동추 및 외팔보의 형태가 설계값과 정확히 일치하며, 외팔보의 표면 상태가 매우 균일함을 알 수 있다.

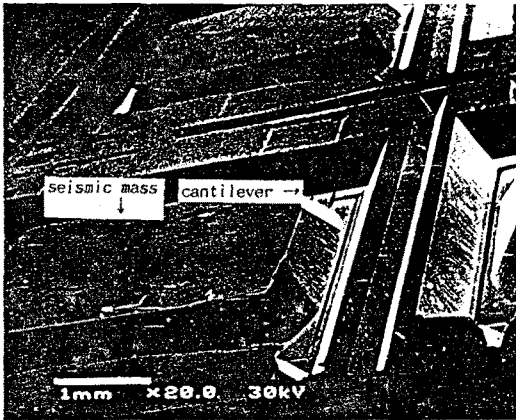


그림 3 SOI 가속도계의 뒷면 SEM 사진
Fig. 3 SEM photograph of the backside of the SOI accelerometer

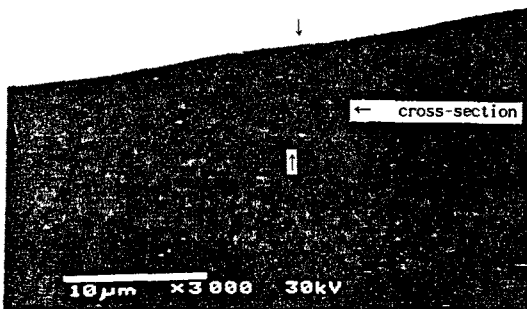


그림 4 외팔보 단면의 SEM 사진
Fig. 4 SEM photograph of the cross-section of the cantilever

4. 결론

본 연구에서는 SOI 구조를 가진 웨이퍼를 이용하여 균일한 두께의 외팔보로 이루어지는 압저항 가속도계를 설계 및 시험 제작하였다. 가속도계는 한 개의 진동추와 네 개의 외팔보를 갖는 3 차원적 형태로 이루어진다. 제작공정은 외팔보 제작을 위한 얇은 식각 및 앞뒷면 정합을 위한 정합 구멍의 식각공정, 압저항 확산공정 및 접촉층 형성공정, 금속배선공정 등의 앞면공정과 얇은 공동의 식각 및 진동추 형성을 위한 깊은식각공정 등의 뒷면공정으로 이루어진다. 식각액으로는 EPW 용액을 이용하였다. 제작 후 SEM을 이용한 외팔보 표면의 관찰 결과로부터, SOI 웨이퍼의 buried oxide층에 의한 식각정지로 인하여 외팔보의 표면이 극히 균일함을 알 수 있다. 이러한 외팔보 두께의 균일도로 인하여, SOI 가속도계의 출력은 감도와 선형성이 종래의 시간 조절법에 의하여 제작된 가속도계에 비하여 월등히 뛰어난 것으로 예상된다.

SOI 구조를 갖는 압저항 가속도계의 개발이 완료되어 양산화 되면 대량생산에 의한 제조비용의 절감 및 신호처리를 단일 칩 내에서 처리함으로써 노이즈의 감소 등 많은 장점이 있으며, 기존 자동차용 센서가 전자식 실리콘 센서로 대체되면서 스마트 시스템들의 보급이 확대될 것으로 기대된다.

5. 참고문헌

1. L. M. Roylance and J. B. Angell, "A Batch - Fabricated Silicon Accelerometer," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-26, pp.1911-1917, Dec. 1979.
2. R. Rudolf, "A Micromechanical Capacitive Accelerometer with a Two-Point Inertial-Mass Suspension," Sensors and Actuators, pp.191-198, 1983.
3. H. Siedel and L. Csepregi, "Design Optimization for Cantilever - Type Accelerometers," Sensors and Actuators, Vol. 5, pp.81-92, 1984.
4. Y. Yamada, K. Higuchi and H. Tanigawa, "A Novel Silicon Accelerometer with a Surrounding Mass Structure," Transducers '89 Digest, pp. 308-311, Montreux, Switzerland, June 1989.
5. K. T. Petersen, A. Shartel and N. F. Raley, "Micromechanical Accelerometer Integrated with MOS Detection Circuitry," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-29, pp.23-27, Jan. 1982.
6. P. Chen, et al., "Integrated Silicon Microbeam PI-FET Accelerometer," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-29, pp.27-33, Jan. 1982
7. B. Boxenhorn and P. Greiff, "Monolithic Silicon Accelerometer," Transducers '89 Digest, pp.273-277, Montreux, Switzerland, June 1989.
8. 양 의 혁, 양 상 식, "압저항 가속도계를 위한 실리콘 공진자에 관한 연구," 전기학회 논문지, 제 41권 10호, pp. 1164-1171, 1992.10.
9. Y. Kanda, "A Graphical Representation of The Piezoresistance Coefficients in Silicon," IEEE Trans. Electron Devices, Vol.ED-29, Jan. 1982.