

압전저항 가속도계를 위한 실리콘 공진자에 관한 연구

양 의 혁 양 상 식

아주대학교 제어공학과

A Study on a Silicon Resonator for Piezoresistive Accelerometer

°Eui Hyeok Yang Sang Sik Yang

Dept. of Control Eng. Ajou Univ.

Abstract

A piezoresistive silicon resonator which can be used as an accelerometer is designed and fabricated using silicon micromachining techniques. The device consists of a seismic mass and four deflection beams in which eight piezoresistors are diffused. The structure is fabricated by EPW etching process. The piezoresistors are properly arranged and connected to make a bridge circuit, with which acceleration in only one direction can be measured.

According to the experimental results, the first resonant frequency of this resonator is above 15 kHz, and this transducer has a sensitivity of 5.56 $\mu V/Vg$.

1. 서 론

집적회로 제조기술의 발달로 기계장치와 센서의 극소형화가 가능해짐에 따라 이에 관한 연구가 필요하게 되었다. 최근 수 년간 실리콘 마이크로 머시닝 기술을 이용한 많은 종류의 센서들이 개발되었는데 그 중에서도 압력센서, 가속도 센서 등과 같은 메카니컬 센서들에 대한 연구가 가장 활발하게 진행되고 있다. (1-4)

가속도 센서는 대체로 deflection 형과 null 형으로 분류된다. Deflection 형은 진동이나 순간적 충격을 측정하는데 사용되고 null 형은 비행기나 우주선, 잠수함 등의 관성 유도 또는 항법 등에 쓰인다. 이 중 deflection 형은 압전 (piezoelectric) 효과나 압전저항효과(piezoresistive) 등을 이용하는 데 종래의 가속도 센서들은 대부분 스트레인 게이지와 같이 금속의 압전효과를 이용하고 있다. 이러한 가속도 센서들을 사용하기 위해서는 별도의 증폭기 및 주변회로를 갖추어야 하므로 좁은 장소나 정비되어 있지 않은 환경에서의 사용이 어렵다. 반면 반도체 집적회로 제조기술을 이용한 극소형 실리콘 가속도 센서는 집적회로 제작시 수많은 전자회로를 단일 칩에 집적하듯이 가속도 센서와 신호처리회

로를 하나의 실리콘 칩에 집적하여 제조함으로써 제작비용을 줄일 수 있고 잡음의 영향을 적게 받으며, 시스템의 소형화 및 경량화가 쉬우므로 좁은 공간에서도 사용이 가능하다.

본 연구에서는 극소형 실리콘 가속도 센서 연구의 전단계로서 실리콘 가속도 센서에 필수적인 공진자와 압전저항의 설계 및 제작과 검사를 수행하였다. 공진자는 캔틸레버(cantilever)와 진동추(seismic mass)로 구성하고 이 구조의 진동에 관한 해석을 이용하여 적절한 감도와 주파수 대역을 갖도록 공진자의 형태와 크기를 설계하였다. 공진자 제작시에는 실리콘의 비등방 식각법을 사용하고 특히 진동추 부분은 메사(mesa) 형태를 가지므로 이 구조의 하부 부식(corner undercutting)에 관한 식각실험을 먼저 행하였다. 압전저항은 공진자의 캔틸레버 표면에 붕소를 확산하여 제작하였고 가속도와 주파수를 각각 변화시키며 브리지 출력을 측정하여 공진자의 동작특성을 조사하여 보았다.

2. 공진자의 구조와 진동해석

가속도 센서에 있어서 가장 중요한 요소는 감도와 주파수 응답이다. 원하는 감도 및 공진 주파수를 얻기 위해서는 공진자를 구성하는 진동추와 캔틸레버 구조의 진동에 관한 해석이 필수적이다.

본 연구에서 공진자는 그림 1과 같이 한 개의 진동추를 네 개의 캔틸레버가 지탱하는 구조로 되어있는데 앞면과 뒷면의 정합을 위한 가로, 세로 각각 약 20 μm 인 네 개의 구멍이 뒷면으로부터 식각되어 있으며 식각깊이의 관찰 및 압전저항의 저항치 측정을 위한 다수의 테스트 패턴들이 공진자 주위에 배치되어 있다. 하부 부식을 보상하기 위해 보상된 마스크를 이용하나 하부부식의 편차때문에 모서리가 완벽한 형태로 식각되지 않을 것에 대비하여 캔틸레버는 진동추의 모서리로부터 200 μm 떨어진 곳에 위치한다. 압전 저항은 캔틸레버 양끝 표면에 확산하며 캔틸레버의 힘을 저항의 변화로 감지하게 되어 있다.

그림 1의 구조에서 수직 방향의 운동만을 고려할 경우 그림 2와 같은 시스템으로 가정할 수 있다. 여기서 $y_1(t)$ 은 베이스(base)의 절대 변위를, $y(x,t)$ 는 베이스에 대한 캔틸

레버의 상대 변위를 나타내고, M 은 진동추의 질량을, m 은 캔틸레버의 질량을 나타낸다. 캔틸레버의 단면적이 길이에 비해 매우 작고 균일하면 다음과 같은 미분 방정식을 얻는다. (5)

$$I \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \frac{m}{l} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = - \frac{m}{l} \frac{\partial^2 y(t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

여기서 E 는 Young's modulus 이고, I 는 중립축에 대한 관성 모멘트, l 은 캔틸레버의 길이이다. 이때의 경계조건은 다음과 같다.

-) $y(0,t) = 0$
-) $\frac{\partial y(0,t)}{\partial x} = 0$
-) $\frac{\partial y(l,t)}{\partial x} = 0$
-) $EI \frac{\partial^3 y(l,t)}{\partial x^3} = \frac{M}{4} \frac{\partial^2 y(l,t)}{\partial x^2} + \frac{M}{4} \frac{\partial^2 y(t)}{\partial x^2}$

캔틸레버의 상대변위, y 를 시간에 대해 Laplace 변환한 $Y(x,s)$ 의 일반해는 식 (2) 로 주어진다.

$$Y(x,s) = C_1 \sin \beta_n x + C_2 \cos \beta_n x + C_3 \sinh \beta_n x + C_4 \cosh \beta_n x - Y_1(t) \quad (2)$$

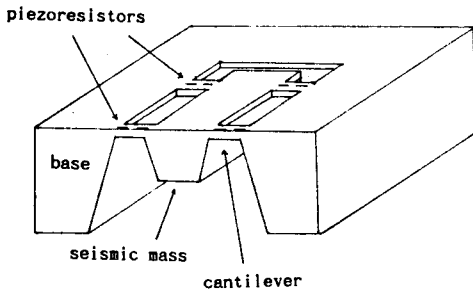


그림 1 공진자 구조
Fig. 1 The structure of the resonator.

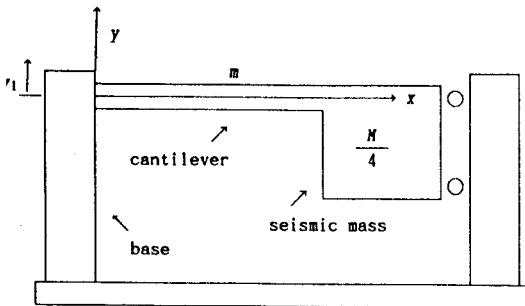


그림 2 진동 해석을 위한 공진자 모델
Fig. 2 The resonator model for vibration analysis.

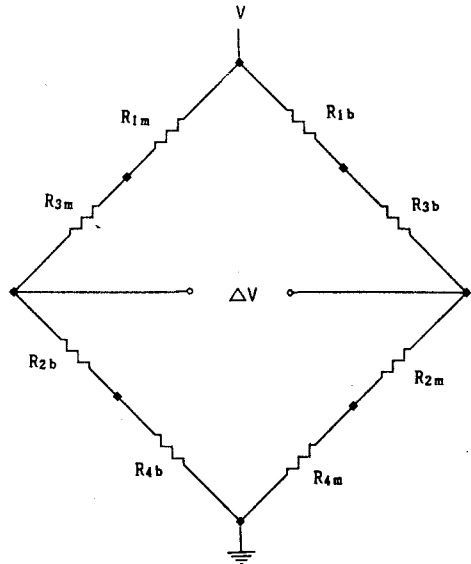


그림 3 브리지 회로 배치도
Fig. 3 The configuration of the bridge circuit.

베이스의 진동에 의해 캔틸레버가 휘게 되면 캔틸레버 표면의 $x = 0$ 와 $x = l$ 에서 최대의 스트레인이 발생한다. 경계조건을 이용하여 β_n 및 C_1, C_2, C_3, C_4 를 구한다음 베이스에 작용하는 가속도, \ddot{Y}_1 에 대한 캔틸레버 표면에 걸리는 최대 스트레인, ϵ_{max} 의 관계를 구한다.

$$\left. \frac{\epsilon_{max}(s)}{s^2 Y_1(s)} \right|_{s=j\omega} = \left. \frac{-\frac{h}{2} \frac{\partial^2 Y(x,s)}{\partial x^2} \Big|_{x=0,l}}{s^2 Y_1(s)} \right|_{s=j\omega} = \pm \frac{3MI/4Ebh^2}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \quad (3)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{4Ebh^3}{MI^3}}$$

여기서 b 는 캔틸레버의 폭이고, h 는 캔틸레버의 두께이다. 식 (3) 은 압전저항이 $x = 0$ 와 $x = l$ 에만 위치하며 표면에만 분포되어 있다고 가정했을 때의 값이다. 확산된 압전저항의 길이는 $l/2.5$, 확산깊이는 약 $h/20$ 이고, 그에 따른 스트레인의 분포를 고려하여 계산하면 예상되는 실제 스트레인, ϵ_{eff} 는 다음과 같다.

$$\epsilon_{eff} = \eta \epsilon_{max} \quad (4)$$

본 연구의 공진자에 대해서는 $\eta = 0.45$ 였다. 식 (3), (4) 에서 공진주파수, f_n 및 저주파 영역에서의 감도, S 를 그림 3 과 같은 브리지 회로를 이용하여 얻을 수 있다.

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4Ebh^3}{MI^3}} \quad (5)$$

$$S = \frac{\Delta}{\omega} \left| \frac{\Delta V}{\omega^2 Y_1(j\omega)V} \right|_{\omega=0} = \left| \frac{\Delta R/R}{\omega^2 Y_1(j\omega)} \right|_{\omega=0} = \left| \frac{\Pi E \epsilon_{eff}(j\omega)}{\omega^2 Y_1(j\omega)} \right|_{\omega=0}$$

$$= \frac{3 \Pi M l \eta}{4 b h^2} \quad (6)$$

여기서 Π 는 압전 저항 계수이고, R 은 압전저항, V 는 브리지 인가전압을, ΔV 는 브리지 출력전압을 나타낸다. 그림 3 의 브리지 회로에서 각 압전 저항들의 저항치가 모두 동일하다고 가정하면 식 (6), (6) 으로부터 $b = 300 \mu\text{m}$, $h = 25 \mu\text{m}$, $l = 500 \mu\text{m}$, $M = 2.67 \text{ mg}$ 일 때 계산되는 감도와 공진주파수는 각각 $13.5 \mu\text{V/Vg}$, 16.4 kHz 임을 알 수 있다.

3. 실험 및 결과

3.1 예비 식각실험

본 실험에서는 비저항이 $10 \Omega\text{cm}$ 이고, 두께가 $520 \mu\text{m}$ 인 직경 4 inch 의 N형, (100) wafer를 사용하였다. 식각에 사용된 식각액은 EPW 로 Ethylenediamine 300 ml, Pyrocatechol 48 g, Water 96 ml 를 혼합해 $115 \pm 2^\circ\text{C}$ 에서 사용하였다. 공진자의 제작을 위해서는 $200 \mu\text{m}$ 이상의 깊은 식각을 세차레에 걸쳐 행하게 되므로 식각시 용액의 조성비와 온도의 유지가 매우 중요하다. 이를 위해 교반기, 되흐름기(refluxing system) 및 온도조절기 등을 이용해 용액의 조성비 및 온도변화를 억제하였다.

수 차례의 식각실험을 통하여 $1.23 \sim 1.27 \mu\text{m}/\text{min}$ 의 식각률을 얻을 수 있었는데 용액의 조성비나 온도 등이 일정하지 않을 경우 식각면이 불균일하게 되며 식각률의 예측이 어렵게 된다. 이 경우 (100) 면의 식각률 뿐만 아니라 매사모서리의 상대적인 하부 부식률까지 변하는 것으로 관찰되었다. 이미 EPW 를 이용한 비등방성 식각에서 하부 부식으로 인한 매사구조의 변화에 관해서는 많은 연구가 행해진 바 있다.(6,7) 하부 부식으로 인한 모서리부에서 (100) 면과 만나는 면은 (211) 면과 (212) 면인 데 (100) 면과 각각 65.19° , 48.19° 를 이룬다. 이 중에서 [110]로 정합된 매사구조에서 하부 부식으로 인해 생기는 면은 (212) 이다.

3.2 제조 공정

제조 공정은 다음과 같은 순서로 이루어진다.

- I. 공진자 진동을 위한 공간의 식각(뒷면)
- II. 정합 구멍 식각(뒷면)
- III. 진동추 및 다이어프램 식각(뒷면)
- IV. 압전저항 확산(앞면)
- V. 컨틸레버 식각(앞면)
- VI. 접촉창 형성(앞면)
- VII. 금속 배선(앞면)

I 의 식각은 공진자가 진동할 때 필요한 공간을 형성하기 위한 공정이며 II 는 I 의 뒷면 식각 공정이 끝난 후 앞면 패턴과의 정합을 위하여 기준이 되는 구멍을 I 의 공정으로 형성된 식각면의 네 모서리에 식각한다. I 과 III 의 식각은 식각 깊이의 정확한 조절이 필요하므로 두 번에 걸쳐 식각하였다. 특히 III 의 진동추 식각은 하부부식을 방지하기 위해 보상된 마스크를 이용하고, 정확한 형상을 얻기 위해서

용액의 조성비 및 온도 유지에 매우 세심한 주의를 요한다. $250 \mu\text{m}$ 를 식각하기 위해서는 약 200 분이 소요된다. 식각 실험 결과 $250 \mu\text{m}$ 식각에 대해 $\pm 10 \mu\text{m}$ 정도의 오차가 발생하므로 먼저 전체 식각완료 예정시간의 90% 인 180 분 정도를 식각한 후 시편을 꺼내어 테스트 패턴 및 단면 관찰 등을 통해 두번째 식각 공정 여부를 결정한다. IV 의 압전저항은 시편의 앞면에 확산되므로 II 에서 식각된 정합 구멍을 이용하여 앞뒷면의 패턴을 정합하였다. 원하는 압전 저항 계수를 얻기 위하여 시뮬레이션(SUPREM 이용)을 통해 사전에 공정변수를 추출하였으며 붕소 확산공정 후 4 point-probe를 이용해 측정된 결과 면저항이 $81 \Omega/\square$ 로 확인되었다. 드라이브인이 끝난 후 40 분간 다이어프램(diaphragm)을 식각하여 컨틸레버를 제작하였다(V). 접촉창을 위한 사진식각 공정 후 Al 진공증착기를 이용해 Al 을 증착하고 각 확산저항들이 브리지형으로 연결되도록 금속공정을 행하였다(VI, VII). 제작된 공진자의 브리지 임피던스는 $1.48 \text{ k}\Omega$ 이다. 그림 4 는 제작된 공진자 뒷면의 SEM 사진이다.

3.3 측정 방법 및 결과

그림 5(a)는 실리콘 공진자의 고주파 특성($500 \sim 14\text{kHz}$)을 조사하기 위하여 본 연구에서 제작한 측정 시스템의 블록도이다. 압전 저항으로 이루어지는 브리지 회로에는 전지를 이용하여 $9.0 \pm 0.1 \text{ V}$ 의 전압을 걸어준다. 기준 가속도 센서로는 Bokusui 6066 Accelerometer 를 사용하였으며 Ling Dynamic Systems 200 Series Vibrator 를 사용하여, 제작된 공진자와 기준 가속도 센서를 함께 진동시킨다. 가속도는 Digital Vibration Meter 로 읽고 브리지 회로의 출력은 Spectrum Analyzer 로 측정된다. 저주파 특성을 조사하기 위해서는 그림 5(b)와 같이 DC 모터에 정현파를 인가하여 진동을 발생시키는 방법으로 500 Hz 미만에서의 저주파 응답을 얻을 수 있다.

그림 6은 가속도가 0.4 g , 1 g , 5 g 일 때 주파수를 $10 \text{ Hz} \sim 14 \text{ kHz}$ 로 변화시키며 공진자의 브리지 출력 전압 값을 관찰한 결과이다. 저주파 영역에서 측정된 감도는 $5.56 \mu\text{Vg}$ 인데 이것은 이론치의 약 41.2% 에 해당한다. 이와 같이 감도가 떨어지는 것은 확산저항들 간의 저항치 차이, 앞뒷면 정합시의 오차, 컨틸레버 두께의 불균형 등에 의한 결과로 생각된다.

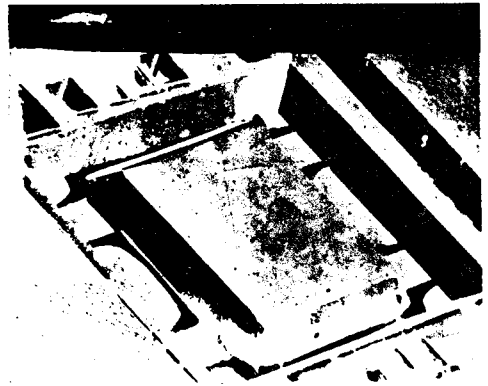
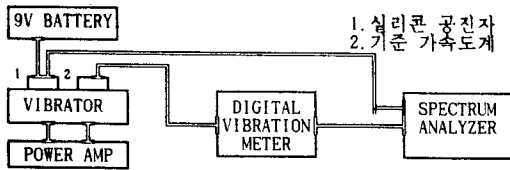
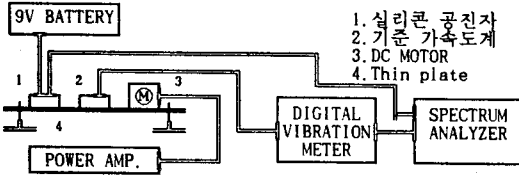


그림 4 공진자의 SEM 사진
Fig. 4 SEM photograph of resonator.



(a)



(b)

그림 5 측정 시스템의 블럭도

(a) 고주파용

(b) 저주파용

FIG. 5 The measurement system for resonator.

(a) for high frequency,

(b) for low frequency

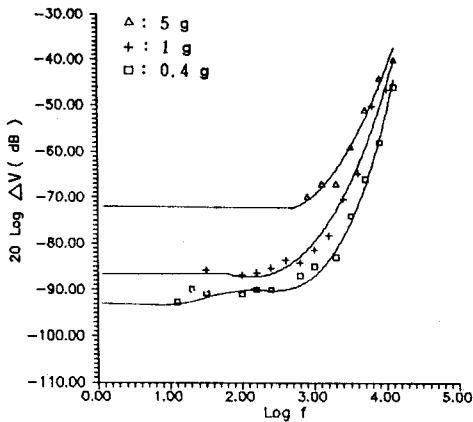


그림 6 브리지 출력전압의 주파수 응답

Fig. 6 The frequency response of the output voltage of the bridge circuit.

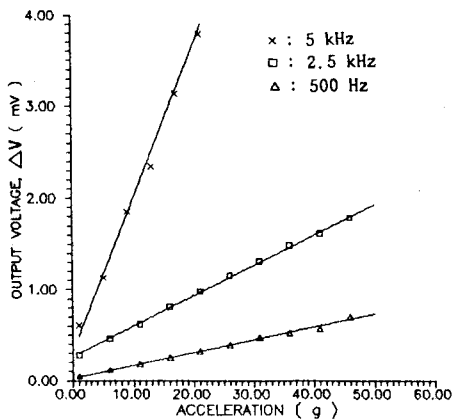


그림 7 가속도에 따른 브리지 출력전압

Fig. 7 The bridge output as a function of applied acceleration

그림 7 은 각각 500 Hz, 2.5 kHz, 5 kHz 의 주파수에서 가속도를 0.1 g ~ 50 g 로 변화시킬때 공진자의 출력단으로부터 얻어지는 전압값의 변화를 나타낸 것이다. 각각 인가되는 가속도가 증가함에 따라 센서의 출력값이 선형적으로 증가함을 볼 수 있다.

4. 결 론

실리콘 마이크로머시닝 기술을 이용하여, 극소형 실리콘 가속도 센서를 위한 압전저항형 실리콘 공진자를 제작하고 그 동작특성을 조사하였다. 이 transducer의 감도는 5.56 $\mu\text{V/Vg}$ 로 측정되었고 공진자의 공진주파수는 15 kHz 이상인 것으로 평가되었으며 측정가능 범위는 0.1 g 에서 50 g 이다. 이후 공진자의 구조를 개선하고 신호처리회로 및 온도보상회로 등을 집적화한 실리콘 가속도 센서를 단일 칩으로 제작한다면 에어백 시스템 뿐만 아니라 자동차의 현가장치(suspension systems), 반제동장치(ABS) 등의 광범위한 분야에 응용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. O. N. Tuft, P. W. Chapman and D. Long, "Silicon Diffused-Element Piezoresistive Diaphragms," J. of Appl. Phys., Vol. 33, No. 11, pp. 3322-3327, Nov. 1962.
2. L. M. Roylance and J. B. Angell, "A Batch-Fabricated Silicon Accelerometer," IEEE Trans, Electron Devices, Vol. ED-26, No. 12, pp.1911-1917, Dec. 1979.
3. F. Rudolf, A. Jornod and P. Bencze, "Silicon Microaccelerometer," Transducers '87 Digest of Technical Papers, p.395, June 1987.
4. H. Sandmaier, K. Kühn, E. Obermeier, "A Silicon Based Micromechanical Accelerometer with Cross Acceleration Sensitivity Compensation," Transducers '87 Digest of Technical Papers, p.399, June 1987.
5. L. Meirovich, Analytical Method in Vibrations, Macmillan, 1967.
6. K. E. Bean, "Anisotropic Etching of Silicon," IEEE Trans, Electron Devices, Vol. ED-25, No.10, pp.1185-1193, Oct. 1978.
7. X. P. Wu and W. H. Ko, "A Study on Compensation Corner Undercutting in Anisotropic Etching of (100) Silicon," Transducers '87 Digest of Technical Papers, p. 126, June 1987.