

표면미세가공기술을 이용한 수평감지방식의 정전용량형 다결정 실리콘 가속도계의 설계, 제작 및 가공 오차 영향 분석

김종팔* · 한기호* · 조영호*
(2000년 9월 19일 접수, 2001년 1월 15일 심사완료)

Design, Fabrication and Micromachining Error Evaluation for a Surface-Micromachined Polysilicon Capacitive Accelerometer

Jong-Pal Kim, Ki-Ho Han and Young-Ho Cho

Key Words: Microaccelerometer(미소가속도계), Grid Electrode(격자형 전극), Capacitive Detection (정전용량 감지), Perforated Proof-Mass(다공질량체), Uncertainty Analysis(불확도 분석)

Abstract

We investigate a surface-micromachined capacitive accelerometer with the grid-type electrodes surrounded by a perforated proof-mass frame. An electromechanical analysis of the microaccelerometer has been performed to obtain analytical formulae for natural frequency and output sensitivity response estimation. A set of prototype devices has been designed and fabricated based on a 4-mask surface-micromachining process. The resonant frequency of $5.8 \pm 0.17\text{kHz}$ and the detection sensitivity of $0.28 \pm 0.03\text{mV/g}$ have been measured from the fabricated devices. The parasitic capacitance of the detection circuit with a charge amplifier has been measured as $3.34 \pm 1.16\text{pF}$. From the uncertainty analysis, we find that the major uncertainty in the natural frequency of the accelerometer comes from the micromachining error in the beam width patterning process. The major source of the sensitivity uncertainty includes uncertainty of the parasitic capacitance, the inter-electrode gap and the resonant frequency, contributing to the overall sensitivity uncertainty in the portions of 75%, 14% and 11%, respectively.

1. 서 론

최근 미소가속도계^(1~9)는 에어백, 미끄럼방지 제동(Antilock Break) 및 능동현가(active suspension) 시스템과 같은 자동차 전장시스템을 구성하는 핵심요소로 주목받고 있다. 이러한 가속도계 중 표면미세가공기술에 의해 제작되는 가속도계는 제조공정이 기존의 반도체 CMOS 공정과 호환될 수 있고, 대량생산이 가능한 장점이 있는 반면, 가속도계의 수율, 재현성 그리고 균질성을 증가시키기 위해서 구조 및 공정오차가 가속도계의 성능에 미치는 불확도를 줄이는 방안이 필요하다.

본 논문에서는 표면미세가공기술에 의해 제작되는 정전용량형 가속도계(Fig. 1)의 새로운 구조를 제안하고 이들의 설계, 제작 그리고 시험 결과들을 기술하며, 가속도계의 구조 및 제조공정 오차가 주파수 및 감도의 불확도에 미치는 주요 원인에 대해 분석·토의한다.

2. 해 석

Fig. 1은 본 논문에서 제안하는 정전용량형 가속도계의 평면구조도이다. 이 가속도계는 다공평판 질량체(mass)와 이를 지지하는 지지보(tether), 그리고 보와 실리콘 기판의 접합부인 앵커(anchor)로 이루어져 있으며, 다공평판 질량체의 중앙부에 격자모양의 이동전극과 이에 상응하는 고정전극들이 있다. 다공평판형 질량체는 두 쌍의 지지보로 지지되어 있으며, 이 지지보는 가속도계의 강성으로 작용한다. 가속도에 의해 다공질량체가 기판과 평행하게 z 방향으로 움직이며,

* 한국과학기술원 기계공학과
마이크로머신 및 마이크로시스템 연구실
† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : mems@kaist.co.kr
TEL : (042)869-3038 FAX : (042)869-3050

기존의 가속도계^(5~9)들이 평판질량체와 외팔보형 빗살 전극을 이용하는 것에 반해, 본 가속도계는 다공질량체와 양단지지보형 격자 전극으로 구성된 것이 특징이다. 이러한 격자형태의 이동전극은 양단이 다공질량체에 고정되어 있어 외팔보형 전극^(5~9)에 비해 희생층 식각시 표면장력에 의한 강성의 증가로 점착(sticking) 문제⁽¹⁰⁾가 줄어들어 수율이 높아지며, 다공질량체는 평판질량체에 비해 희생층 제거 속도가 빨라질 뿐만 아니라 점착 문제가 줄어드는 장점이 있다.

2.1 해석

가속도계에 인가된 진동, $z_b(t) = Z_b \sin \omega t$,에 의한 질량체의 움직임은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$z(t) = Z \sin(\omega t - \phi) \tag{1}$$

여기서 Z 와 ϕ 는 아래와 같이 진폭과 위상을 각각 나타낸다.

$$Z = \frac{Z_b r^2}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \tag{2a}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{2\zeta r}{1-r^2} \right] \tag{2b}$$

식 (2a)와 (2b)에서, r 과 ζ 는 각각 가속도계의 주파수 비와 감쇠 상수로서 다음과 같이 정의된다.

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \tag{3a}$$

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} \tag{3b}$$

여기서 ω_n 과 m 그리고 c 는 각각 가속도계의 각 고유진동수, 질량 그리고 감쇠계수이다.

Fig. 1에서 도시한 가속도계의 고유주파수, f_n ,는 다음과 같이 구해진다.

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{4}$$

여기서 가속도계의 질량과 강성은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$m = \rho t(l_e b_e n_e + A) \tag{5a}$$

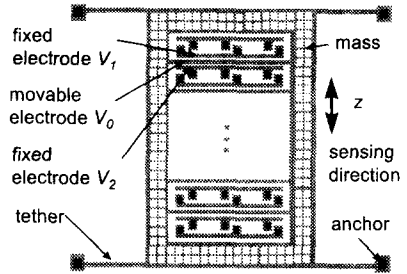


Fig. 1 A schematic diagram of the accelerometer with the grid-type electrodes, composed of variable-gap capacitors

$$k = \frac{4Et b^3}{l^3} \tag{5b}$$

여기서 ρ 는 밀도; t 는 가속도계 구조물의 두께; n_e, l_e, b_e 는 각각 이동전극의 개수, 길이, 폭; A 는 질량부의 면적; l, b, E 는 각각 지지보의 길이, 폭, 탄성계수를 나타낸다.

저 주파수비($r \ll 1$), 저감쇠($\zeta \ll 1$) 진동의 경우 식 (1)은 다음과 같이 단순화된다.

$$z(t) = -\frac{Z_b \omega^2}{\omega_n^2} \sin(\omega t - \phi) \tag{6}$$

이때 질량체의 진폭은 인가된 가속도, $Z_b \omega^2$,에 비례하고 ϕ 만큼 위상차를 가진다. 입력 가속도의 최대 진폭은 $\omega = Z_b \omega^2$ 로 표현되고, 식 (6)으로부터 질량부의 최대 진폭, $|z|$,은 다음과 같이 표시된다.

$$|z| = \frac{a_0}{\omega_n^2} \tag{7}$$

이동전극과 고정전극간의 초기 정전용량은 아래 식 (8)과 같이 전극이 마주보는 면적, A_e ,에 비례하고 전극간의 간격, d ,에 반비례한다.

$$C_0 = \epsilon \frac{A_e}{d} n_c \tag{8}$$

여기서 ϵ 는 전극 사이 물질의 유전율이고 n_c 는 단위 정전용량의 개수이다. 이때 가속도에 대한 정전용량의 감도는 다음과 같이 정의된다.

$$S = \frac{\Delta C}{a_0} \tag{9}$$

여기서 ΔC 는 입력 가속도, a_0 ,에 의한 정전용량

의 변화이다.

Fig. 2는 차동 정전용량형을 측정하기 위한 회로 모델이다. $V_1 = -V_2$ 인 경우, 정전용량 감지 회로의 출력 전압은 다음과 같이 표시된다.

$$V_{out} = -\frac{V_1}{C_f + C_p} \Delta C \quad (10a)$$

여기서 정전용량 변화, ΔC ,는 아래와 같이 이동 전극의 변위, Δz ,의 함수이다.

$$\Delta C = 2C_0 \frac{\Delta z}{d} \quad (10b)$$

식 (2a)과 (10b)에 의해, 식 (10a)의 출력 전압은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$V_{out} = -\frac{V_1}{C_f + C_p} \left(\frac{2C_0}{d} \right) \frac{a_0}{4\pi^2 f_n^2 \sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (11)$$

여기서 $a_0 = Z_b \omega^2$ 이며 f_n 는 식 (4)에서 정의되었다.

3. 설계

가속도계의 설계에 앞서 미소 제작공정에 의한 제약조건을 다음과 같은 정리하였다. 우선 구조물의 두께를 제작이 용이한 범위내에서 3.3 μm 로 미리 결정하였다. 최소 전극간의 간격과 구조물의 최소 폭은 RIE 공정을 고려하여 각각 3 μm 와 4 μm 로 결정하였다. 10 μm 의 정렬 오차를 고려하여 최소 접촉 크기를 10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 로 결정하였고, 이로부터 엔커 크기를 30 $\mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 로 결정하였다. 따라서 이동전극간의 간격은 50 μm 로 결정되었다.

앞 장에서 서술된 설계 식들로부터, 위에서 언급한 제작공정에 의한 제약조건들과 자동차 에어백용 가속도계의 설계 사양(Table 1)들을 만족하는 가속도계의 치수를 결정하였다. 식 (2a)로부터, $\zeta \ll 1$ 인 경우 가속도계에 의한 변위의 오차가 0.4%이기 위해서는 주파수 비, r ,가 0.063이내 이어야함을 알 수 있다. 따라서 측정되어야 하는 최대 주파수가 400Hz이므로 고유주파수의 최소값은 6.4kHz이다. 고유주파수가 6.4kHz이고 최대 측정 가속도가 50g이므로, 식 (7)로부터 질량체의 최대 변위는 0.3 μm 이다. 식 (8)로부터 최소 정전

Table 1 Airbag accelerometer design specification

Measurement range	50g
Maximum amplitude deviation	0.4%
Frequency range	0 ~ 400Hz

용량 조건을 120fF로 가정하여 n_e 을 15로 정하였다. 설계과정에서 실리콘의 밀도, $\rho = 2.33\text{g/cm}^3$,와 탄성계수, $E = 150\text{GPa}^{(11)}$ 를 사용하였다.

$a_0 = 50\text{g}$, $z = 0.3 \mu\text{m}$ 그리고 $d = 3 \mu\text{m}$ 인 조건들로부터, 식 (9)에 의해 감도는 $S = 0.47\text{fF/g}$ 로 예측할 수 있으며, 식 (4)와 (5a)로부터, 이동전극의 길이 800 μm , 이동전극의 폭 4 μm , 이동전극의 개수 15 그리고 구조물 격자의 폭 4 μm 임을 이용하면 전체 질량체의 질량은 $2.8 \times 10^{-9}\text{kg}$ 이 된다. 식 (5b)로부터 지지보의 길이는 300 μm 로 결정하였으며, 설계된 가속도계의 주요치수를 Table 2의 첫째 열에 정리하였다.

4. 제작 공정

Fig. 3은 4장의 mask를 이용한 표면미세가공기술을 이용한 가속도계의 제작 과정을 나타낸 것

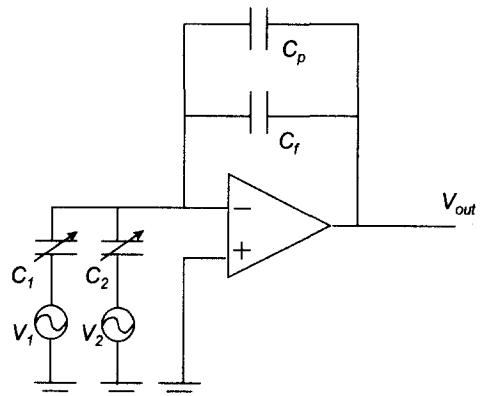


Fig. 2 Capacitive detector circuit model: C_f and C_p indicate the reference capacitance and the parasitic capacitance, respectively

이다. 먼저 실리콘 웨이퍼에 가속도계와 기관간의 기생 정전용량을 최소화하기 위해 $1\mu\text{m}$ 두께의 산화막을 성장시킨다. 그 위에 식각 방지층으로 사용될 LPCVD(Low Pressure Chemical Vapor Deposition) $\text{Si}_3\text{N}_4(2000\text{\AA})$ 를 증착시킨다.(Fig. 3(a)) 다시 구조물의 배선으로 사용될 다결정 실리콘(2000\AA)을 증착시킨 후, 이 다결정 실리콘의 전도성을 높이기 위해 인(phosphorus)을 확산한다. 배선으로 사용되는 이 다결정 실리콘을 Poly1이라 정의한다. 배선을 형성하기 위해 다결정 실리콘을 패터닝하고, 그 위에 $2.2\mu\text{m}$ 두께의 PSG(PhosphoSilicate Glass)를 증착한다. 이 PSG에 구조물을 지지할 언커를 형성하고(Fig. 3(b)), 그 위에 구조물을 형성할 다결정 실리콘(Poly2)을 $3.3\mu\text{m}$ 증착한다.(Fig. 3(c)) 다시 이 위에 PSG $1.5\mu\text{m}$ 를 증착하고, 구조물을 형성할 다결정 실리콘의 잔류응력의 대칭성을 위해 1100°C 에서 2.5시간동안 열처리를 거친 다음, 구조물을 형성하기 위하여 위의 PSG와 다결정 실리콘을 패터닝한다.(Fig. 3(d)) 이러한 열처리는 다결정 실리콘의 잔류응력 제거^(12,13)뿐만 아니라 잔류응력 구배 제거를 위해 Poly2의 표면에 인(phosphorous)을 대칭적으로 확산시키는 역할을 한다. 이후 PSG를 모두 제거한 다음, 전극을 형성시킬 금속을 증착, 패터닝하여 Fig. 3(e)와 같이 가속도계 제작을 완료한다. Fig. 4는 완성된 가속도계의 SEM 사진이다.

5. 측정 및 분석

제작된 가속도계에서 주요치수들을 측정하였으며, 그 결과를 설계 치수와 함께 Table 2에 정리하였다. 구조물의 두께는 α -step 장치를 이용하여 $3.7\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 다른 치수들은 제작된 미소구조물의 간격을 기준으로 측정하였으며, 측정 오차 또한 Table 2에 함께 기입하였다.

제작된 가속도계의 질량과 정전용량은 각각 $3\mu\text{g}$ 와 133ff 으로 예측되었으며, 유도된 이론식과 측정된 치수를 이용하여 제작된 가속도계의 성능을 Table 3과 같이 예측하였다.

5.1 정전기력 공진 시험

가속도계의 공진주파수, f_s 는 DC 바이어스 전

압에 의한 전극간 정전기력의 영향^(14,15)을 고려하면 다음과 같이 유도된다.

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(k - \frac{\epsilon A V^2}{d_1^3}\right) / m} \quad (12)$$

여기서 등가 전극 간격, d_1 은 다음과 같이 탄생

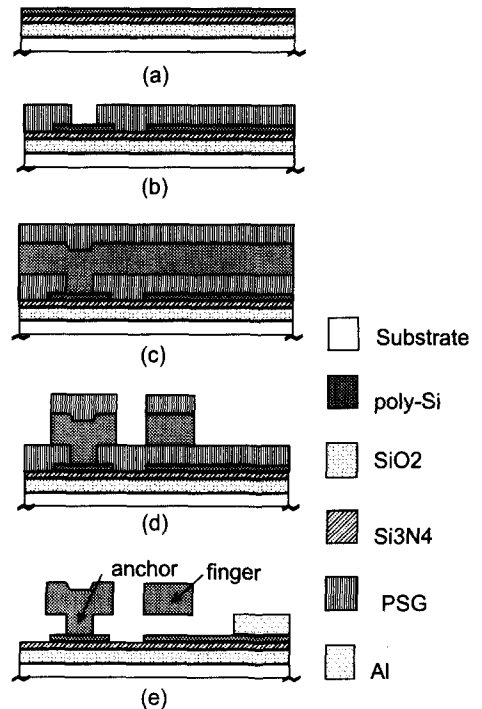


Fig. 3 Microfabrication process

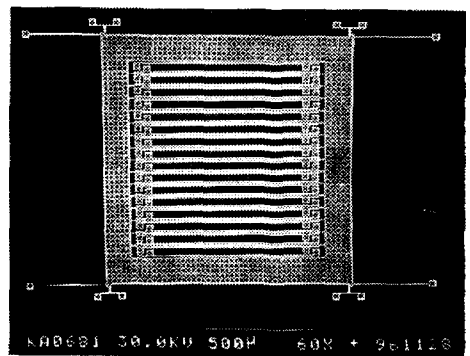


Fig. 4 A top view of the microfabricated accelerometer

력과 정전기력의 균형상태에서 구할 수 있다.

$$k(d-d_1) = \frac{1}{2} \frac{\epsilon A}{d_1^2} V^2$$

따라서 가속도계의 고유주파수는 다음과 같이 표현된다.

$$f_n^2 = f_s^2 + \frac{\epsilon A}{4\pi^2 m a_1^3} V^2 \quad (13)$$

여기서 f_n 는 정전기력의 영향이 없는 경우 가속도계의 고유주파수; f_s 는 정전기력의 영향을 고려한 경우의 공진주파수이다.

가속도계의 고유주파수를 측정하기 위해서, 가속도계를 probe station에서 정전기력으로 공진시킨다. DC 3.0V와 AC 2.7V를 고정전극과 이동전극 사이에 인가하였을 때, 정전구동기의 공진주파수는 $5.6 \pm 0.33\text{kHz}$ 로 측정되었으며, 식 (13)과 (5b)들로부터 고유주파수와 탄성계수는 각각 $5.7 \pm 0.33\text{kHz}$, $103 \pm 11.6\text{GPa}$ 임을 알 수 있었다.

5.2 가진 시험

Fig. 5는 가속도계의 가진 장치의 구성을 도시하고 있다. 가진한 상태에서 기준 가속도계를 이용하여 가진 가속도를 측정하였고, 제작된 가속도계로부터 출력 신호를 측정하였다. 측정 결과로부터 제작된 가속도계의 고유주파수가 $5.8 \pm 0.17\text{kHz}$ 로 측정되었으며, 100Hz의 정형파 가진시 $0.28 \pm 0.03\text{mV/g}$ 감도를 측정하였다. 제작된 가속도계의 성능 측정치과 예상치를 Table 3에 비교하였다.

본 연구에서 사용한 감지회로의 기생정전용량이 $3.34 \pm 1.16\text{pF}$ 인 것으로 측정되었으며, 기생 정전용량의 불확도는 기생 정전용량 측정에 사용된 기준 저항과 기준 정전용량의 오차에서 기인되었다.

6. 불확도 분석 및 평가

식 (4)와 (5)에 의하면, 고유주파수의 불확도는 탄성계수, E , 구조물의 폭, b , 그리고 길이, l , 질량체의 평판면적, A ,의 독립 변수들의 불확도에 의해 결정된다.

Table 2 Designed and fabricated dimensions of the accelerometer

Dimensions	Designed	Fabricated
Thickness [μm]	3.3	3.7 ± 0.23
Tether length [μm]	300	300 ± 0.4
Tether width [μm]	4.0	4.1 ± 0.4
Capacitor gap [μm]	3.0	3.0 ± 0.4
Electrode width [μm]	4.0	4.1 ± 0.4
Chip size [$\mu\text{m} \times \mu\text{m}$]	1700×1800	1700×1800

Table 3 Estimated and measured performance of the accelerometer

	Estimated	Measured
Frequency[kHz]	$5.6 \pm 0.3^{1)}$	5.8 ± 0.17
Sensitivity[mV/g]	$0.29 \pm 0.1^{2)}$	0.28 ± 0.03

- 1) Based on the Young's modulus of $E=103 \pm 11.6\text{GPa}$, corrected from the resonance test.
- 2) Based on the Young's modulus of $E=103 \pm 11.6\text{GPa}$, the carrier voltage of 2.5V, the measured parasitic capacitance of $3.34 \pm 1.16\text{pF}$, and the measured circuit gain of 0.65.

$$\Delta f_n = \sqrt{(\Delta f_E)^2 + (\Delta f_b)^2 + (\Delta f_l)^2 + (\Delta f_A)^2} \quad (14)$$

여기서 Δf_E , Δf_b , Δf_l , Δf_A 는 각각 탄성계수, 지지보의 폭과 길이 그리고 질량부의 평판면적의 불확도에 의한 고유주파수 변화들이다. 이동전극의 폭과 지지보의 폭이 같을 때, $b_e=b$, 이동전극의 길이 변화에 의한 주파수 불확도는 지지보 길이의 변화에 의한 것에 비해 무시 될 수 있다. 식 (4)와 (5)로부터 Δf_b , Δf_A 그리고 Δf_E 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta f_b = \frac{\partial f_n}{\partial b} \Delta b = \frac{3f_n}{2b} \Delta b \quad (15a)$$

$$\Delta f_A = \frac{\partial f_n}{\partial A} \Delta A = -\frac{f_n}{2A} \Delta A \quad (15b)$$

$$\Delta f_E = \frac{\partial f_n}{\partial E} \Delta E = \frac{f_n}{2E} \Delta E \quad (15c)$$

Table 4 Uncertainty in the sensitivity estimation

Total uncertainty in the sensitivity	ΔV_{out}	0.10mV/g
Effect of the uncertainty in parasitic capacitance*	$V_{out} \frac{\Delta C_p}{C_f + C_p}$	0.087mV/g
Effect of the uncertainty in capacitor gap	$V_{out} \frac{\Delta d}{d}$	0.038mV/g
Effect of the uncertainty in natural frequency	$2V_{out} \frac{\Delta f_n}{f_n}$	0.033mV/g

* Based on the circuit gain of 0.65, the initial gap of 3 μm , and $V_c=2.5\text{V}$, $C_f=500\text{fF}$, $C_p=3.34\text{pF}$, $C_1, C_2=133\text{fF}$ in Fig. 2.

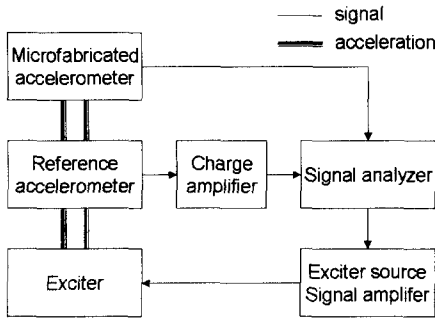


Fig. 5 Instrumentation for the excitation test of the accelerometer

여기서 ΔA 는 질량체 평판면적의 불확도이고 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta A = \sqrt{(n_e l_e \Delta b_e)^2 + (2n_w b_w \Delta b_w)^2} \quad (15d)$$

여기서 n_e 와 l_e 는 이동전극의 개수와 길이이고, n_w 와 b_w 그리고 Δb_w 는 각각 구멍의 개수, 폭 그리고 크기의 불확도이다. 식 (14)와 (15)를 이용하여 주파수 예측치의 불확도를 구할 수 있다.

지지보 폭 및 질량부 평판면적의 제조공정 오차는 예측된 고유주파수의 불확도에 큰 영향을 미친다. 즉 지지보 폭의 제조공정오차에 의한 고유주파수의 불확도는 식 (15b)로부터 $\pm 0.83\text{kHz}$

로 예측되며, 질량부 평판면적의 제조공정오차에 의한 고유주파수의 불확도는 식 (15c)로부터 $\pm 0.065\text{kHz}$ 로 예측된다. 따라서 치수 오차에 의한 전체 고유주파수의 불확도는 $\pm 0.83\text{kHz}$ 이며, 이것의 주요 원인은 지지보 폭의 제조공정오차임을 알 수 있다.

측정된 고유주파수의 불확도는 설계된 값의 14.6%이었다. 이 결과로부터 가속도계의 고유주파수 불확도가 5% 이내이기 위해, 지지보 폭의 제조공정오차를 3.3% 보다 작게 해야 한다는 결론을 얻을 수 있다. 예를 들어 지지보 폭의 제조공정오차가 0.4 μm 정도라면, 지지보 폭의 제조공정오차를 3.3% 보다 작게 하기 위해 지지보 폭을 12 μm 보다 크게 해야 하며, 가속도계의 고유주파수를 위해 지지보 길이는 900 μm 이어야 한다. 따라서 제작공정오차가 0.4 μm 일 경우, 가속도계의 고유주파수 불확도를 5% 이내로 유지하기 어려움을 알 수 있다. 본 가속도계의 경우, 고유주파수 불확도를 5% 이내로 하기 위해 제작공정오차를 0.13 μm 보다 작게 해야 함을 알 수 있다.

식 (11)로부터 감도의 불확도는 각 독립변수인 기생 정전용량, 전극 간격 그리고 고유주파수의 불확도에 의해 결정된다.

$$\Delta V^2_{out} = \left(\frac{\partial V_{out}}{\partial C_p} \Delta C_p \right)^2 + \left(\frac{\partial V_{out}}{\partial d} \Delta d \right)^2 + \left(\frac{\partial V_{out}}{\partial f_n} \Delta f_n \right)^2 \quad (16a)$$

식 (10)과 (16a)로부터 전체 감도의 불확도는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta V_{out} = \sqrt{\left(V_{out} \frac{\Delta C_p}{C_f + C_p} \right)^2 + \left(V_{out} \frac{\Delta d}{d} \right)^2 + \left(2V_{out} \frac{\Delta f_n}{f_n} \right)^2} \quad (16b)$$

식 (16)로부터 예측된 가속도계 감도의 불확도를 Table 4에 정리하였다. 감도의 불확도에서 기생 정전용량과 전극간의 간격 그리고 고유주파수의 불확도에 의한 영향이 각각 75%, 14% 그리고 11% 씩 발생하고 있으며, 이로부터 감도의 주요 불확도는 기생 정전용량에 의해 발생함을 알 수 있다. 따라서 감도의 정확한 예측을 위해 기생 정전용량이 정확히 측정되어야 하며, 감도의 재생성을 증가시키기 위해 가속도계의 전극 간격과 고유주파수는 설계된 값으로 정확히 유지되어야 한다. 예를 들어 기생 정전용량이 3.34pF, 전극

간격이 $3\mu\text{m}$ 그리고 고유주파수가 5.8kHz 일 때 10%의 감도 불확도를 유지하기 위해 기생정전용량, 전극간격 및 고유주파수의 오차가 각각 0.18pF , $0.1\mu\text{m}$ 그리고 0.1kHz 로 유지되어야 한다.

7. 결론

본 논문에서는 다공평판 질량체가 격자형 전극을 둘러싸고 있는 형태의 정전용량형 다결정 실리콘 가속도계를 해석, 설계, 제작, 시험하였고, 이의 불확도를 분석, 평가하였다.

4장의 마스크를 이용한 표면미세가공기술에 의해 제작된 가속도계로부터 탄성계수가 $103 \pm 11.6\text{GPa}$ 로 측정되었다. RIE공정을 통한 제조 오차는 $\pm 0.4\mu\text{m}$ 로 측정되었고, 이는 $3\mu\text{m}$ 의 최소 선평에서 13%의 치수 오차에 해당한다.

정전기력을 이용한 공진 시험과 가진 시험으로부터 측정된 가속도계의 고유주파수는 각각 $5.7 \pm 0.3\text{kHz}$, $5.8 \pm 0.17\text{kHz}$ 이었다. 감지회로의 기생정전용량은 $3.34 \pm 1.16\text{pF}$ 으로 측정되었고, 제작된 가속도계 감도의 측정치 및 예측치는 각각 $0.28 \pm 0.03\text{mV/g}$, $0.29 \pm 0.1\text{mV/g}$ 임을 알 수 있었다.

고유주파수와 감도의 불확도 분석으로부터 고유주파수의 불확도는 지지보 폭의 제조공정오차가 주된 요인이었으며, 감도의 불확도는 주로 기생 정전용량, 전극 간격 그리고 고유주파수에 의한 불확도들에 의해 발생하였다.

참고문헌

- (1) Roylance, L.M., and Angell, J.B., 1979, "A Batch-Fabricated Silicon Accelerometer," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-27, No. 12, pp. 1911~1917.
- (2) Sandmaier, H., Kuhl, K., and Obemeier, E., 1987, "A Silicon Based Micromechanical Accelerometer with Cross Acceleration Sensitivity Compensation," *Proc. 4th Int. Conf. Solid-state Sensors and Actuators*(Transducers '87), Tokyo, Japan, pp. 339~402.
- (3) Ko, J.-S., Kim, G.H., Cho, Y.-H., Lee, K., Kwak, B.M., and Park, K., 1995, "A Self-Diagnostic Airbag Accelerometer with Skew-Symmetric Proof-Mass," *Proc. Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, Amsterdam, The Netherlands, pp. 163~167.
- (4) Suzuki, S., Tuchitani, S., Sato, K., Naito, S., Ueno, S., Suzuki, M., Ichikawa, N., and Sato, M., 1991, "Semiconductor Capacitance-Type Accelerometer with PWM Electrostatic Servo Technique," *Proceedings of the Conference SAE91*, Detroit, U.S.A., pp. 51~57.
- (5) Payne, R.S., and Dinsmore, K.A., 1991, "Surface Micromachined Accelerometer: a Technology Updates," *Proceedings of the Conference SAE91*, Detroit, U.S.A., pp. 127~135.
- (6) Kuehnel, W., and Sherman, S., 1994, "A Surface Micromachined Silicon Accelerometer with On-Chip Detection Circuitry," *Sensors and Actuators*, A45, pp. 7~16.
- (7) Kuehnel, W., 1995, "Modelling of the Mechanical Behaviour of a Differential Capacitor Acceleration Sensor," *Sensors and Actuators*, A48, pp. 101~108.
- (8) Chau, K.H.-L., Lewis, S.R., Zhao, Y., Howe, R.T., Bart, S.F., and Marcheselli, R.G., 1995, "An Integrated Force-Balanced Capacitive Accelerometer for Low-G Applications," *Proc. 8th Int. Conf. Solid-state Sensors and Actuators*(Transducers '95), Stockholm, Sweden, pp. 593~596.
- (9) 고중수, 조영호, 광병만, 박관흠, 1996, "에어백용 압저항형 외팔보 미소 가속도계의 설계, 제작 및 시험," 대한기계공학회 논문집, 제20권 제2호, pp. 408~413.
- (10) Mastrangelo, C.H., and Hsu, C.H., 1993, "Mechanical Stability and Adhesion of Microstructures Under Capillary Forces - Part I & II," *J. Microelectromech. Sys.*, Vol. 2, No. 1, pp. 33~55.
- (11) Cho, Y.-H., 1990, "Design, Fabrication and Optimization of Micromechanical Flexures," Ph.D. Dissertation, University of California at Berkeley.
- (12) Guckel, H., 1989, "Mechanical Properties of Fine Grained Polysilicon the Repeatability Issue," *Tech. Digest., IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, SC, pp. 96~99.

- (13) Krulevitch, P., Howe, R.T., Johnson, G.C., and Haung, J., 1991, "Stress in Undoped LPCVD Polycrystalline Silicon," *Tech. Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators*(Transducers '91), San Francisco, pp. 949~952.
- (14) Lee, K.B., Yoon, J.-B., Kang, M.-S., Cho, Y.-H., Youn, S.-K., Kim, C.-K., 1996, "A Surface-Micromachined Tuneable Microgyroscope," *Proc. IEEE Conf. on Emerging Tech. and Factory Automation*, Kauai, Hawaii, pp. 498~502.
- (15) Seo, K.-S., Cho, Y.-H., and Youn, S.-K., 1996, "A Bulk-Micromachined Silicon Micromirror for Tuneable Optical Switch Applications," *ibid*, pp. 404~407.