

고 감지 전압을 이용한 개인 정보기기용 고정도 정전용량형 단결정 실리콘 가속도계

한기호* · 조영호*

A High Resolution Capacitive Single-Silicon Microaccelerometer using High Amplitude Sense Voltage for Application to Personal Information System

Ki-Ho Han and Young-Ho Cho

Key Words: High Resolution Accelerometer (고정도 가속도계), Mechanical Noise (기계적 잡음), Electrical Noise (전기적 잡음), High Amplitude Sense Voltage (고 감지 전압), Branched Finger Electrode (가지형 전극), Electrostatic Self Force-Balancing (정전 자율 균형력)

Abstract

This paper presents a high resolution capacitive microaccelerometer for applications to personal information systems. We reduce the mechanical noise level of the microaccelerometer by increasing the proof-mass based on deep RIE process. We reduce the electrical noise level by increasing the amplitude of an AC sense voltage. The high sense voltage is obtained by DC-to-DC voltage multiplier. In order to solve the nonlinearity problem caused by the high sense voltage, we modify the conventional comb electrode of straight finger type into that of branched finger type, resulting in self force-balancing effects for enhanced detection linearity. The proposed branched finger capacitive microaccelerometer was fabricated by the deep RIE process of an SOI wafer. The fabricated microaccelerometer reduces the electrical noise at the level of $2.4 \mu g/\sqrt{Hz}$ for the sense voltage of 16.5V, which is 10.1 times smaller than the electrical noise level of $24.3 \mu g/\sqrt{Hz}$ at 0.9V. For the sense voltage higher than 2V, the electrical noise level of the microaccelerometer became smaller than the constant mechanical noise level of $11 \mu g/\sqrt{Hz}$. Total noise level, including the electrical noise and the mechanical noise, has been measured as $9 \mu g/\sqrt{Hz}$ for the sense voltage of 16.5V, which is 3.2 times smaller than the total noise of $28.6 \mu g/\sqrt{Hz}$ for the sense voltage of 0.9V. The self force-balancing effect results in the increased stiffness of 1.98 N/m at the sense voltage of 17.8V, compared to the stiffness of 1.35 N/m at 0V, thereby generating the additional stiffness at the rate of 0.002 N/m/V^2 .

1. 서론

표면미세가공기술은 기존의 반도체 회로 제작 기술과 호환이 잘되는 장점이 있어 미소가속도 센서 제작에 널리 사용되는 기술이다. 대부분의 상용화된 미소가속도계⁽¹⁻³⁾는 이 표면미세가공기술에 의해 제작되었으며, 이들의 사양은 일반적으로 감지 범위가 $\pm 50g$ 이고 분해능이 약 1

mg/\sqrt{Hz} 정도이다. 이러한 가속도계의 사양은 자동차 에어백 시스템의 응용을 위한 것이다. 한편 차세대 가속도계 응용분야에서는 수십 배 이상 좋은 분해능이 요구되며, 최근 휴대용 정보 기기, 자동차의 능동 현가(active suspension) 시스템, 컴퓨터 입력장치, 게임기, 단시간 항법장치 등과 같은 분야⁽⁴⁾에서의 필요성이 증대되고 있다.

정전용량형 가속도계 분해능의 이론적인 한계는 기계적 잡음과 전기적 잡음에 의해 결정된다. 기계적 잡음은 가속도계 구조물 주위 공기의 브라운(Brown) 운동에 의해 구조물이 흔들림에 의해 발생하는 잡음이며, 이는 구조물의 질량이나

* 한국과학기술원
디지털나노구조연구단
마이크로머신 및 마이크로시스템 연구실

큐(quality) 계수를 증가시킴으로서 감소될 수 있다. 전기적 잡음은 회로소자의 자유전자들의 브라운 운동에 의해 발생하는 것이며, 가속도계의 고유주파수를 줄임으로서 줄어들 수 있다.

최근 상용화된 고충횡비 건식식각(deep RIE) 공정을 이용하여 가속도계 구조물의 질량 증가가 용이하게 됨에 따라 기계적 잡음이 전기적 잡음에 비해 작아지게⁽⁵⁾ 되었다. 따라서, 마이크로시닝(MEMS) 기술에 의한 정전용량형 가속도계의 분해능 향상을 위해서는 전기적 잡음을 감소시키는 것이 기술적 관건이 되고 있다.

본 논문은 정전용량형 가속도계의 고정 전극에 고 감지 전압을 인가하여 전기적 잡음을 줄임으로써 정전용량형 가속도계의 분해능을 향상시키는 방법을 제안하고 이에 대한 분석 및 시험 결과들을 기술하며, 또한 고 감지 전압으로 발생하는 문제들과 이를 해결하는 방안 및 시험 결과들에 대해 분석·토의한다.

2. 정전용량형 가속도계의 설계 및 해석

2.1 구조 및 거동 해석

가속도계는 외부에서 인가되는 가속도에 의해 구조물의 변위가 발생하고, 이 변위에 해당되는 전기신호를 발생한다. 정전용량형 가속도계는 질량체 구조물과, 기관과 질량체 사이의 기계적 강성을 형성하는 지지보로 구성되어 있으며, 이동전극과 고정전극 사이에 동일 크기의 정전용량을 형성하며, 인가된 가속도에 의한 질량체의 변위가 감지 정전용량의 차이로 나타난다. 이러한 정전용량의 변화는 고정전극에 인가되는 감지 전압에 의하여 이동전극에 전압으로 유도되며, 이동전극에 연결된 증폭기를 통하여 측정된다.

이러한 가속도계의 변위, x ,는 2차 도함수에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + k_m \cdot x = F_{ext} = m \cdot a_{ext} \quad (1)$$

여기서 m 은 질량체의 질량이고, b , k_m 는 각각 가속도계의 감쇠 계수와 기계적 강성이다. F_{ext} 는 구조물에 가해지는 관성력이며, a_{ext} 는 외부로부터 인가된 가속도이다. 식(1)의 도함수를 라플라스(Laplace) 변환을 이용하여 정리하면 다음과 같이 표기된다.

$$\frac{X(s)}{A(s)} = \frac{1}{s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

여기서 $\omega_n = \sqrt{k_m/m}$ 이고, $\zeta_n = b/2\omega_n m$ 이다. 식(2)로부터 공진주파수 이하의 주파수대역에서 변위는 $x = a_{ext}/\omega_n^2$ 로 표시되며, 외부 가속도에 비례함을 알 수 있다.

2.2 잡음 분석

서론에서 설명된 것과 같이 가속도계의 잡음은 기계적 잡음과 전기적 잡음으로 분류된다. 먼저 기계적 잡음, \bar{a}_{mm} ,은 다음 식⁽⁶⁾과 같이 표기된다.

$$\bar{a}_{mm} = \sqrt{\frac{4k_B T \omega_n}{m \cdot Q_n}} [m/s^2/\sqrt{Hz}] \quad (3)$$

여기서 k_B 는 Boltzmann 상수, T 는 절대온도 그리고 $Q_n (= 1/2\zeta_n)$ 는 가속도계의 큐 계수이다.

전기적 잡음, \bar{v}_{ne} ,은 감지회로 소자들에서 발생하는 잡음⁽⁷⁾으로 증폭기의 뒷쪽단에서 발생하는 잡음 원은 무시되고 주로 증폭기 앞단에서 발생하는 잡음⁽⁸⁾에 의해 결정된다. 전압으로 표현되는 전기적 잡음을 정전용량형 가속도계의 등가 가속도로 표기하면 다음의 식과 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{a}_{ne} = \frac{d_a}{dx} \frac{dx}{dC} \frac{dC}{dVx} \bar{v}_{ne} \propto \frac{d_0 \omega_n^2}{V_S} \bar{v}_{ne} [m/s^2/\sqrt{Hz}] \quad (4)$$

여기서 \bar{a}_{ne} 는 전기적 잡음의 등가 가속도, d_0 는 고정전극과 이동전극 사이의 거리이고 V_S 는 감지 전압이다.

식(4)로부터 가속도계의 고유진동수 감소나 전극 사이의 거리 감소, 혹은 감지 전압의 증가에 의해 전기적 잡음이 작아짐을 알 수 있다. 고유진동수를 작게 하는 것은 앞에서 설명된 것과 같이 가속도계의 주파수응답 범위를 작게하는 문제가 있으며, 전극 사이의 거리, d_0 ,를 줄이는 것은 제조공정상의 한계에 의해 약 1~2 μm 이상으로 제약된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 전기적 잡음을 줄이기 위하여 고 감지 전압 사용을 제안한다.

고 감지 전압을 이용하면 고 감지 전압을 발생하기 위한 고 전압 원이 필요하며, 고 감지 전압에 의해 가속도계의 선형성이 나빠지는 문제점들

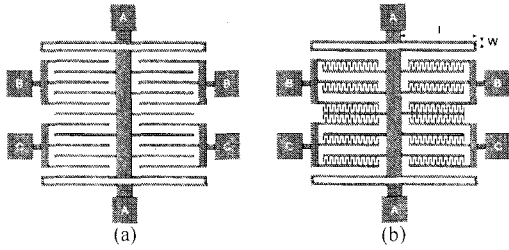


Fig. 1. Schematic of the capacitive accelerometer: (a) comb finger type accelerometer; (b) branched finger type accelerometer

이 발생한다. 본 논문에서는 먼저 고 전압 원 문제를 해결하기 위해 기존의 회로기술인 직류 대 직류(DC-to-DC) 변환 기술⁹⁾을 사용한다. 또한 고 감지 전압을 이용할 경우 기존의 빗살전극 정전용량형 가속도계, 그림 1(a),는 선형성이 나빠지는 문제가 발생하므로, 본 논문에서는 이 문제를 해결하기 위하여 그림 1(b)와 같은 가지전극 정전용량형 가속도계의 구조를 고안하였다. 이 구조는 회로적으로 피드백 루프를 형성하여 가속도계의 강성을 키지게 만드는 기존의 균형력 발생과는 달리 구조적으로 자율 균형력을 발생하는 구조이므로 고 감지 전압을 사용한 미소가속도계에 매우 유용할 것으로 판단되며, 이에 대한 자세한 설명은 다음 장에 서술된다.

2.3 감지 성능 분석

그림 2는 본 논문에서 제안하는 가지전극 정전용량형 가속도계의 고정전극과 이동전극 한 쌍을 보이는 그림이다. 먼저 고정전극과 이동전극 사이의 정전용량은 다음과 같이 표기된다.

$$C_1 = C_{0P1} + C_0 + \Delta C \quad [F] \quad (5a)$$

$$C_2 = C_{0P2} + C_0 - \Delta C \quad [F] \quad (5b)$$

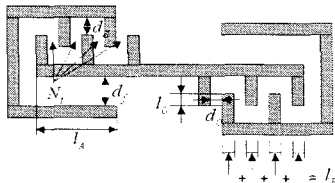


Fig. 2. One finger of the branched finger type capacitive accelerometer

여기서 C_{0P1} 와 C_{0P2} 는 고정전극과 이동전극 사이의 기생 정전용량들이며, C_0 는 감지 정전용량이고 ΔC 는 변위, x ,가 발생하였을 때의 감지 정전용량의 변화량이다. 한편 감지 정전용량, C_0 ,은 다음과 같이 표기될 수 있다.

$$C_0 = \epsilon_0 t \left[\frac{N l_0}{d_0} + \frac{l_A}{d_f} + \frac{l_B}{d_s} \right] \quad [F] \quad (6)$$

여기서 ϵ_0 는 가속도계 구조물 주위 공기의 유전율이고 t 는 구조물의 두께이다. N 는 빗살전극(comb)이 마주보는 개수이고 l_0 는 빗살전극이 마주보는 길이이다. d_0 , l_A , d_f , l_B , d_s 는 각각 그림 2에서 보이는 것과 같다. 식(6)을 이용하여 변위, x ,에 의한 감지 정전용량의 변화를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta C = \epsilon_0 t l_0 \left[\frac{N_f}{d_0} - \frac{l_A}{d_f} + \frac{l_B}{d_s} \right] \frac{x}{l_0} \quad [F] \quad (7)$$

또한 변위, x ,에 의한 감지 출력전압, V_x ,를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_x = \frac{2\Delta C}{C_1 + C_2 + C_P} V_S = \gamma \frac{x}{l_0} V_S \quad [V] \quad (8)$$

여기서 C_P 는 증폭기의 입력단자와 접지 사이의 기생 정전용량이며, V_S 는 고정전극에 인가된 감지 전압의 크기이다. 또한 γ 는 다음과 같다.

$$\gamma = 2\epsilon_0 t l_0 \frac{\left(\frac{N_f}{d_0} - \frac{l_A}{d_f} + \frac{l_B}{d_s} \right)}{C_1 + C_2 + C_P} \quad (9)$$

여기서 $C_{0P} = C_{0P1} = C_{0P2}$ 이다. 이로부터 전기적 강성을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$k_c = - \frac{\partial F}{\partial x} = \frac{2\epsilon_0 t V_S^2}{l_0^2} \left[\frac{N l_0}{d_0} (2 - \gamma) \gamma - \frac{l_A}{d_f} \left(\frac{l_0}{d_f} + \gamma \right) - \frac{l_B}{d_s} \left(\frac{l_0}{d_s} - \gamma \right) \right] - \frac{2C_{0P} V_S^2}{l_0^2} \gamma^2 \quad [N/m] \quad (10)$$

위의 식(10)로부터 가지전극 정전용량형 가속도계의 전기적 강성이 양이 됨을 알 수 있다. 즉 가지전극 정전용량형 가속도계는 회로적인 피드백이 없이 구조적으로 감지 출력전압에 의해 전기적 강성이 양이 되는 자율 균형력이 발생하게 된다.

가지전극 정전용량형 가속도계의 가속도 신호와 잡음에 대한 감지 출력전압은 다음 식과 같다.

$$V_x = \left[\frac{\left(\frac{\gamma}{l_0} V_S \right)^2 (a_{cm}^2 + \bar{a}_{nm}^2) + (s^2 + 2\xi_n \omega_n s + \omega_n^2)^2 \bar{v}_{nc}^2}{s^2 + 2\xi_n \omega_n s + \omega_n^2} \right]^{1/2} \quad [V] \quad (11)$$

여기서

$$\xi_n = \xi_n \frac{\omega_n}{\omega_r} \quad [N \cdot s/m] \quad (12)$$

이다.

식(11)로부터 가지전극 정전용량형 가속도계의 신호 대 잡음 비, SNR,은 다음과 같다.

$$SNR = \frac{\left[\left(\frac{1}{\omega_r} \frac{\gamma}{l_0} V_S \right)^2 \bar{a}_{nm}^2 + \left(\frac{\omega_n}{\omega_r} \right)^2 \bar{v}_{nc}^2 \right]^{1/2}}{\left(\frac{1}{\omega_r} \frac{\gamma}{l_0} V_S \right) \cdot a_{cm}} \quad [V] \quad (13)$$

위의 식(13)으로부터 가속도계의 분해능을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Resolution = \sqrt{\bar{a}_{nm}^2 + \left(\omega_n^2 \frac{l_0}{\gamma} \frac{\bar{v}_{nc}}{V_S} \right)^2} \quad [m/s^2/\sqrt{Hz}] \quad (14)$$

위의 결과에 의하면 감지 전압이 증가함에 따라 전기적 잡음이 감소하며, 분해능은 정전기력이 발생하지 않는 경우와 같이 유지됨을 알 수 있다.

일반적인 가속도계의 경우에 강성이 증가하면 주파수응답 범위가 넓어지는 반면 감도가 줄어드는 문제가 있기 때문에 균형력을 이용하여 감도는 유지하면서 주파수응답 범위를 늘리는 방법을 사용한다. 그러나 본 논문에서 제안된 방법은 감지 전압을 증가시킴으로써 균형력이 증가하면서 주파수응답 범위가 증가함과 동시에 감도 또한 좋아지는 장점이 있다.

3. 제작공정 및 시험

3.1 제조공정

가지전극 정전용량형 가속도계 구조물은 그림 3과 같이 SOI 웨이퍼와 한 장의 마스크를 사용한 고종횡비 건식식각 공정을 이용하여 제작되었다. 가속도계 구조물은 두께가 SOI 웨이퍼의 상부 실리콘 두께인 40 μm 이고, 인으로 고농도 확산되어 0.1 $\Omega \cdot \text{cm}$ 의 비저항을 가진다. 그림 3(b)에서처럼 가속도계의 구조물을 형성하기 위하여 감광제

Table 1. Measured dimension of the branched finger capacitive accelerometer

Structure thickness. t	40 μm
Suspension width. w	2.4 μm
Suspension length. l	500 μm
Suspension stiffness. km	0.31 N/m
Finger gap. d_0	2.6 μm
Finger pitch. p	10 μm
Proof mass. m	13.5 μg
Sensing capacitance. C_0	0.62 pF
Sensor size	1.7 mm^2

를 식각 보호막으로 사용하여 상부 실리콘을 고종횡비 건식식각 공정으로 식각한다. 그림 3(c)과 같이 BOE(Buffered Oxide Etchant)를 이용하여 2 μm 두께의 실리콘 산화막을 제거하고, 와이어 본딩을 위하여 그림 3(d)과 같이 200Å/2000Å 두께의 Cr/Au 박막을 증착하여 가속도계 구조물 제작을 완성한다.

그림 4은 제작된 가속도계 구조물의 SEM 사진이며, 이로부터 측정된 구조물의 치수가 표 1에 정리되었다.

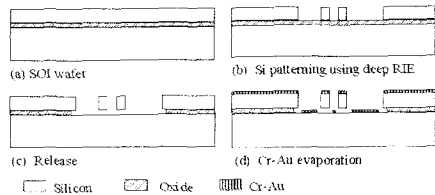


Fig. 3. Fabrication process

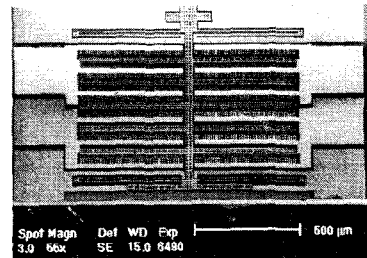


Fig. 4. Scanning electron microscopy picture of the fabricated branched comb finger accelerometer

3.2 측정 및 분석

가치전극 정전용량형 가속도계의 잡음 특성을 측정하기 위하여 제작된 가속도계로부터 그림 5 과 같은 주파수응답 곡선을 측정하였으며, 이로부터 제작된 가속도계의 공진주파수가 1.6 kHz이고 Q 계수가 4임을 알 수 있었다. 제작된 정전용량형 가속도계의 전기적 잡음과 전체 잡음을 그림 6과 같은 방법으로 측정하였다. 전기적 잡음과 전체 잡음의 측정치와 이론 예상치를 그림 7(a)에 도시하였으며, 이로부터 기계적 잡음을 그림 7(b)과 같이 구하였다. 그림 7(a)에서 전기적 잡음의 측정치와 예상치가 낮은 감지 전압에서 잘 일치하고 있는 반면 감지 전압이 증가함에 따라 전기적 잡음의 측정치와 예상치 사이의 차이가 감지 전압 16.5 V에서 최고 89 %까지 차이가 나고 있음을 알 수 있다. 감지 전압이 16.5 V에서 전기적 잡음은 $2.4 \mu g/\sqrt{Hz}$ 이며, 0.9 V에서의 $24.3 \mu g/\sqrt{Hz}$ 에 비해 약 10.1 배 작음을 알 수 있다. 또한 측정된 전체 잡음은 감지 전압 16.5 V에서 $9 \mu g/\sqrt{Hz}$ 이며, 0.9 V에서의 $28.6 \mu g/\sqrt{Hz}$ 에 비해 약 3.2배 작음을 알 수 있다. 그림 7(b)은 기계적 잡음의 측정치와 예상치와 동일하게 감지 전압과 관계없이 일정한 값을 보인다. 그림 8은 제작된 가속도계의 전기적, 기계적 그리고 전체 잡음을 보이고 있다. 감지 전압이 2 V일 때 전기적 잡음은 기계적 잡음인 $11 \mu g/\sqrt{Hz}$ 가 되며, 감

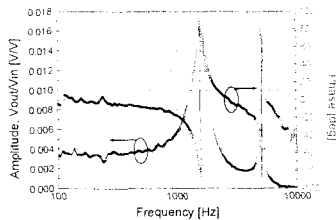


Fig. 5. Frequency response curve of the branched finger comb accelerometer.

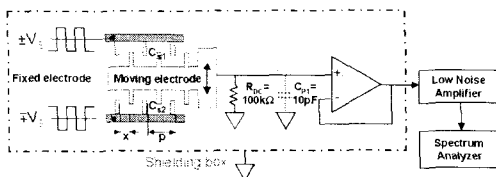


Fig. 6. Measurement scheme of the branched finger capacitive accelerometer

Table 2. Measured noise and corresponding performance of the branched finger capacitive accelerometer dependent on sense voltage

Sense voltage	1V	2V	5V	10V	15V
Total noise [$\mu g/\sqrt{Hz}$]	27.3	15.9	10.5	9.3	9
Electrical noise portion [%]	60	50	36	25	22
Mechanical noise portion [%]	40	50	64	75	78
Minimum detectable displacement [μm]	0.217	0.126	0.08	0.071	0.069
Minimum detectable acceleration [μg]	875	507	321	287	279

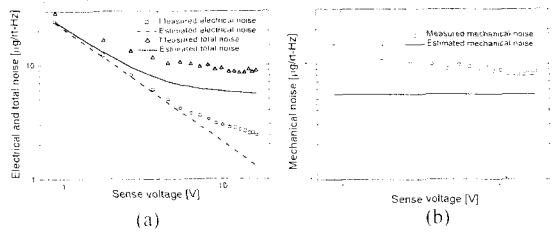


Fig. 7. Measured and estimated noise levels for varying sense voltage: (a) electrical and total noise: (b) mechanical noise

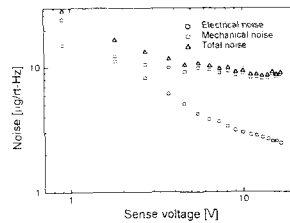


Fig. 8. Measured noise levels for varying sense voltage

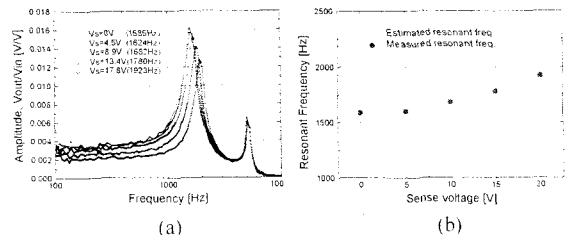


Fig. 9. Frequency response varying sense voltage: (a) frequency response curves: (b) measured and estimated resonant frequency

저 전압이 2 V 이상 증가될 때 전기적 잡음은 기계적 잡음 이하로 줄어들면서 기계적 잡음이 전체 잡음의 주된 비중을 차지하게 된다. 전체 잡음 중 기계적 잡음과 전기적 잡음의 비중과 이로부터 감지할 수 있는 최소 변위와 최소 가속도를 표 2에 정리하였다. 이로부터 제작된 가지전극 정전용량형 가속도계가 감지 할 수 있는 최소 변위는 0.069 mm이고, 최소 가속도는 297 μg 임을 알 수 있다.

가지전극 정전용량형 가속도계의 감지 전압에 따른 강성 변화를 측정하기 위하여 그림 9(a)와 같이 감지 전압에 따른 주파수응답 곡선을 측정하였다. 이로부터 감지 전압이 증가함에 따라 가속도계의 공진주파수가 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이는 가속도계의 유효 강성이 증가하고 있음을 의미하는 것이다. 측정된 공진주파수로부터 감지전압이 0 V 그리고 17.8 V 일 때 제작된 가지전극 정전용량형 가속도계의 강성은 각각 1.35 N/m 그리고 1.98 N/m 임을 알 수 있다. 또한 감지 전압 제곱값에 대한 제작된 가속도계의 전기적 강성 비는 0.002 N/m/V² 임을 알 수 있다. Fig. 9(b)는 감지 전압에 따른 제작된 가속도계의 공진주파수 측정치와 이론 예상치를 보이고 있으며, 서로 잘 일치하고 있음을 보이고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 고 감지 전압을 이용하여 정전용량형 가속도계의 전기적 잡음을 줄임으로써 가속도계의 분해능을 향상하였다. 고 감지 전압은 고 전압 원이 필요하며, 가속도계의 선형성이 나빠지는 문제들을 가지고 있다. 그러나 정전용량형 가속도계에서 감지 전압은 높은 소비전력이 필요한 것이 아니라, 가속도계의 고정 전극단자에 많은 전하를 인가하는 것이 중요한 것이므로, 본 논문에서는 직류 대 직류 전압 상승기를 이용하여 고 전압 원의 문제를 해결할 수 있음을 제안하였다. 또한 고 감지 전압으로 인해 가속도계의 선형성이 나빠지는 문제는 기존의 빗살전극형 가속도계를 대신하여 가지전극 정전용량형 가속도계를 사용함으로써 해결될 수 있음을 보였

다. 또한 본 논문에서 제안된 고 감지 전압을 이용한 가지전극 정전용량형 가속도계는 전기적 잡음이 감소함으로써 분해능이 향상됨과 동시에 자율 균형력이 발생하여 주파수응답 범위가 증가하고 선형성이 향상되는 장점을 가지고 있다.

후기

본 연구는 과학기술부 창의적연구진흥사업단인 디지털나노구동연구단의 “생체모사기법을 응용한 디지털나노구동기관의 구현에 관한 연구” 과제에 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Analog Devices. 1998. *ADXL150- $\pm 5\text{g}$ to $\pm 50\text{g}$, Low Noise, Low Power, Single Dual Axis iMEMS Accelerometers*. Datasheet.
- (2) Motorola. 2000. *MM12201D-Surface Mount Micromachined Accelerometer*. Datasheet.
- (3) M. Offenbergl, H. Münzel, D. Schubert, O. Schatz, F. Lärmer, E. Müller, B. Maihöfer and J. Marek. 1996. "Accelerometer Sensor in Surface Micromachining for Airbag Applications with High Signal/Noise Ratio." *Society of Automotive Engineers SP-1133*. pp.35-41.
- (4) B.E. Boser, R.T. Howe. 1996. "Surface Micromachined Accelerometers." *IEEE J. Solid-State Circuit*. Vol. 31, NO. 3. pp.366-75.
- (5) M.A. Lemkin, T.N. Juneau, W.A. Clark, T.A. Roessig, T.J. Broshihan. 1999. "A Low-Noise Digital Accelerometer using Integrated SOI-MEMS Technology." *Tech. Digest, 10th int. Conf. Solid-State Sensors and Actuator (Transducers'99)*. pp.1294-297.
- (6) T.B. Gabrielson. 1993. "Mechanical-Thermal Noise in Micromachined Acoustic and Vibration Sensors." *IEEE Trans. on Ele. Dev.*, Vol. 40, NO. 5. pp.903-09.
- (7) P.R. Gray, R.G. Meyer. 1977. *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits*. Wiley, 3rd edition, Chap.11.
- (8) F. Bordonil. 1990. "Noise in Sensors." *Sensors and Actuators*. A21-23. pp.17-24.
- (9) F. Dickson. 1976. "On-Chip high voltage generation in MNOS integrated circuit using an improved voltage multiplier technique." *IEEE J. Solid-State Circuit*. Vol.SC-11. pp.374-78.