

Extended SBM 공정을 이용하여 단일 실리콘 기판상에 제작된 새로운 z 축 가속도계

고형호 · 김종팔 · 박상준 · 광동훈 · 송태용 · 조동일[†] · 허건수* · 박장현*

A Novel z-axis Accelerometer Fabricated on a Single Silicon Substrate Using the Extended SBM Process

Hyoung-ho Ko, Jongpal Kim, Sangjun Park, Donghun Kwak, Taeyong Song,
Dong-il Cho[†], Kunsoo Huh*, and Jahng-hyon Park*

Abstract

This paper presents a novel z-axis accelerometer with perfectly aligned vertical combs fabricated using the extended sacrificial bulk micromachining (extended SBM) process. The z-axis accelerometer is fabricated using only one (111) SOI wafer and two photo masks without wafer bonding or CMP processes as used by other research efforts that involve vertical combs. In our process, there is no misalignment in lateral gap between the upper and lower comb electrodes, because all critical dimensions including lateral gaps are defined using only one mask. The fabricated accelerometer has the structure thickness of 30 μm , the vertical offset of 12 μm , and lateral gap between electrodes of 4 μm . Torsional springs and asymmetric proof mass produce a vertical displacement when an external z-axis acceleration is applied, and capacitance change due to the vertical displacement of the comb is detected by charge-to-voltage converter. The signal-to-noise ratio of the modulated and demodulated output signal is 80 dB and 76.5 dB, respectively. The noise equivalent input acceleration resolution of the modulated and demodulated output signal is calculated to be 500 μg and 748 μg . The scale factor and linearity of the accelerometer are measured to be 1.1 mV/g and 1.18% FSO, respectively.

Key Words : Extended SBM, Z-axis accelerometer, vertical comb

1. 서 론

최근 관성 측정 장치(inertial measurement unit, IMU)의 응용 분야가 캠코더, 휴대폰, PDA 등의 휴대용 전자 기기로 확대됨에 따라 저가, 소형의 IMU에 대한 개발 필요성이 대두되고 있다. 일반적으로 6자유도의 IMU는 x, y, z 축 방향의 직선 운동을 감지하는 3축의 가속도계와 pitch, yaw, roll 축 방향의 회전 운동을 감지하는 3축의 각속도계의 총 6개 관성 센서로 구성된다. 그러나 기존의 IMU는 6개의 단일 축 관성 센서들을 각 축 별로 정렬하여 제작되었기 때문에 높은 비용

과 소형화의 한계가 있었고, 그 응용 분야가 제한되었다. 따라서 다축 관성 센서를 단일 기판 상에 집적한 저가 및 소형의 관성 측정 장치에 대한 연구가 필수적이다.

6 축의 관성 센서 중 x, y 축 가속도계 및 z 축 각속도계는 수평 방향 움직임을 갖는 구조물만으로 구현될 수 있다. 그러나 z 축 가속도계 및 x, y 축 각속도계는 추가로 복잡한 수직 방향 움직임을 갖는 구조물을 제작해야 하며, 이는 고난이도의 제작 공정을 필요로 한다. 더구나 기존의 수직 구조물을 제작하는 공정¹⁾은 웨이퍼 접합이나 CMP(chemical mechanical polishing) 등의 복잡한 공정을 필요로 한다는 단점이 있다. 또한 웨이퍼 접합으로 인한 잔류 응력 차이, 열팽창 계수 차이로 인한 온도 민감성 증가 등의 문제점은 고성능의 센서를 제작하는데 있어 걸림돌이 되고 있다²⁾.

본 논문에서는 Extended SBM(extended sacrificial

서울대학교 전기·컴퓨터공학부(School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University)

*한양대학교 기계공학부(Mechanical Engineering, Hanyang University)

[†]Corresponding author: dichon@asri.snu.ac.kr

(Received : February 3, 2004, Accepted : February 20, 2004)

bulk micromachining)⁴⁻⁶ 공정을 이용하여 (111) 방향의 SOI 웨이퍼 상에 제작된, 정렬 오차가 없는 완전 단차의 수직 콦을 가지는 새로운 z 축 가속도계를 제안한다. 기존에 발표된 z 축 가속도계는 DWP(dissolved wafer process) 등의 복잡한 공정을 사용하거나⁷, 완전 단차가 아닌 반단차 수직 콦을 사용하였다⁸. 본 가속도계는 Extended SBM 공정을 이용하여 웨이퍼 간의 접합이나 화학기계적연마와 같은 복잡한 공정 없이 단일 (111) SOI(silicon-on-insulator) 기판상에서 제작되었다. 제작된 가속도계는 첫 번째 사진마스크에서 모든 구조물이 정의되기 때문에 사진 묘화 공정에서 상하부 전극간의 정렬 오차가 발생하지 않는다. 또한 단일 실리콘 기판상에 구조물이 정의되기 때문에, 구조물이 재료적으로 균일하여 온도 변화와 외부 충격에 강인하다는 장점이 있다. 또한 (111) 실리콘 기판을 사용함으로써, 다른 방향의 기판에 비해 공정상에서 발생할 수 있는 결정 방향의 변화에 대해 기계적 특성이 우수하다는 장점이 있다⁹.

2. Extended SBM 공정

SBM 공정은 (111) 방향의 단결정 실리콘 웨이퍼 상에서 푸팅 현상이 없이 깨끗한 바닥면과 큰 회생층 간격을 가지는 고종횡비의 구조물을 제작할 수 있다¹⁰⁻¹⁴. 푸팅 현상은 SOI 웨이퍼 상에서 플라즈마를 이용한 반응성 이온 식각을 수행할 때, 실리콘과 매몰 산화막 사이의 계면에서 원하지 않는 방향으로 식각이 일어나는 현상을 말한다. 이는 구조물의 바닥면을 불균일하게 하여 소자의 성능을 심각하게 열화시키고, 푸팅 현상에 의해 발생한 실리콘 조각들에 의하여 전극간 단락이 발생할 수도 있다. SBM 공정에서는 알칼라인 수용액 상에서 수평 방향 식각을 수행하며, 이 때 푸팅 현상으로 인해 손상된 부분이 모두 제거된다. Extended SBM 공정은 SBM 공정에 기반을 두고 있기 때문에 이러한 SBM 공정의 장점을 모두 수용하며, 단결정 실리콘 상에서 수직 단차를 가지는 완전 정렬된 고종횡비의 구조물을 제작할 수 있다⁴⁻⁶.

Extended SBM 공정은 첫 번째 마스크에서 상하부 구조물간의 수평 간격을 비롯한 평면상의 구조물의 주요 치수를 모두 정의한다. 때문에 상하부 구조물간의 정렬 오차가 없는 완전 정렬된 수직 구조물을 제작할 수 있다. 또한 이후 4회의 deep silicon RIE(reactive ion etching)을 통하여 상하부 구조물의 두께 및 배향 면적, 수직 단차, 회생층 간격 등을 임의로 정의할 수 있다. 그림 1에 Extended SBM 공정의 공정 흐름을 도

시하였다. Extended SBM 공정은 (111) 방향의 실리콘 웨이퍼 상에서 진행되며, 본 논문에서는 전기적 절연을 위하여 SOI 웨이퍼를 사용하였다. 우선 첫 번째 식각 마스크로 TEOS(tetra-ethyl-ortho-silicate)를 증착하고 패터닝한다(그림 1(a)). 이때 이동 전극 및 고정 전극의 치수, 전극간의 수평 간격 등이 모두 정의된다. 이후 PR(photo resist)을 이용하여 두 번째 식각 마스크를 패터닝한다(그림 1(b)). 이때 두 번째 식각 마스크는 추후 상부 전극을 형성하는 부분만을 보호하게 된다. 본 가속도계의 경우 상하부 전극간 수평 간격은 $4 \mu\text{m}(g_L)$ 이며, 상부 전극을 보호하는 두 번째 식각 마스크 패턴은 첫 번째 식각 마스크 패턴보다 약 $1.5 \mu\text{m}(g_A)$ 가량 넓게 설계되어 있다. 이후 첫 번째 및 두 번째 식각 마스크를 식각하면(그림 1(c)), 두 번째 식각 마스크에 의해 보호되지 않은 부분은 t_m 만큼 얇아지게 되며, 다음으로 deep silicon RIE를 이용하여 실리콘을 d_1 만큼 식각하게 된다(그림 1(d)). 이후 두 번째 식각 마스크를 제거하고(그림 1(e)), 다시 deep silicon RIE를 d_2 깊이로 수행하여 상부 구조물의 두께를 정의한다(그림 1(f)). 이후 옆면 보호막을 증착하고 바닥면을 식각하여 바닥 실리콘이 드러나게 한다(그림 1(g)). 이후 deep silicon RIE를 d_3 깊이로 수행하고 회생층을 정의한 후(그림 1(h)), 알칼라인 수용액에서 수평 방향 습식 식각을 수행하여 구조물을 부유시킨다(그림 1(i)). 다음으로 deep silicon RIE를 d_4 만큼 수행하여 수직 단차를 형성한다(그림 1(k)). 마지막으로 식각 마스크와 옆면 보호막을 모두 제거하면(그림 1(l)) 최종 구조물을 얻을 수 있다. 최종 구조물은 상부 구조물의 두께 $t_1 = d_2$, 하부 구조물의 두께 $t_2 = d_1 + d_2 - d_4$, 상하부 구조물간의 수직 겹침 면적 $g_v = d_2 - d_4$, 회생층 간격 d_3 으로 제작된다. 제작된 구조물은 상하부 구조물 사이의 정렬 오차가 없으며, 구조물의 두께 및 회생층 간격, 수직 단차 등을 자유롭게 조절할 수 있다. 또한 알칼라인 수용액에서 습식 식각을 수행하는 과정에서 푸팅 현상으로 인한 문제점들이 제거되는 장점이 있다.

3. Z 축 가속도계의 설계

3.1. 동작 원리

일반적으로 가속도계는 질량체, 스프링, 감쇄기를 이용하여 그림 2와 같이 간단히 모델링 할 수 있다. 본 가속도계의 경우 이동 전극 및 이와 연결된 검지 질량이 질량체에 해당하며, 이를 지지하는 비틀림 보가 스프링에 해당하고, 공기 저항은 감쇄기에 해당한다.

본 논문에서 제안된 z 축 가속도계는 그림 3과 같이

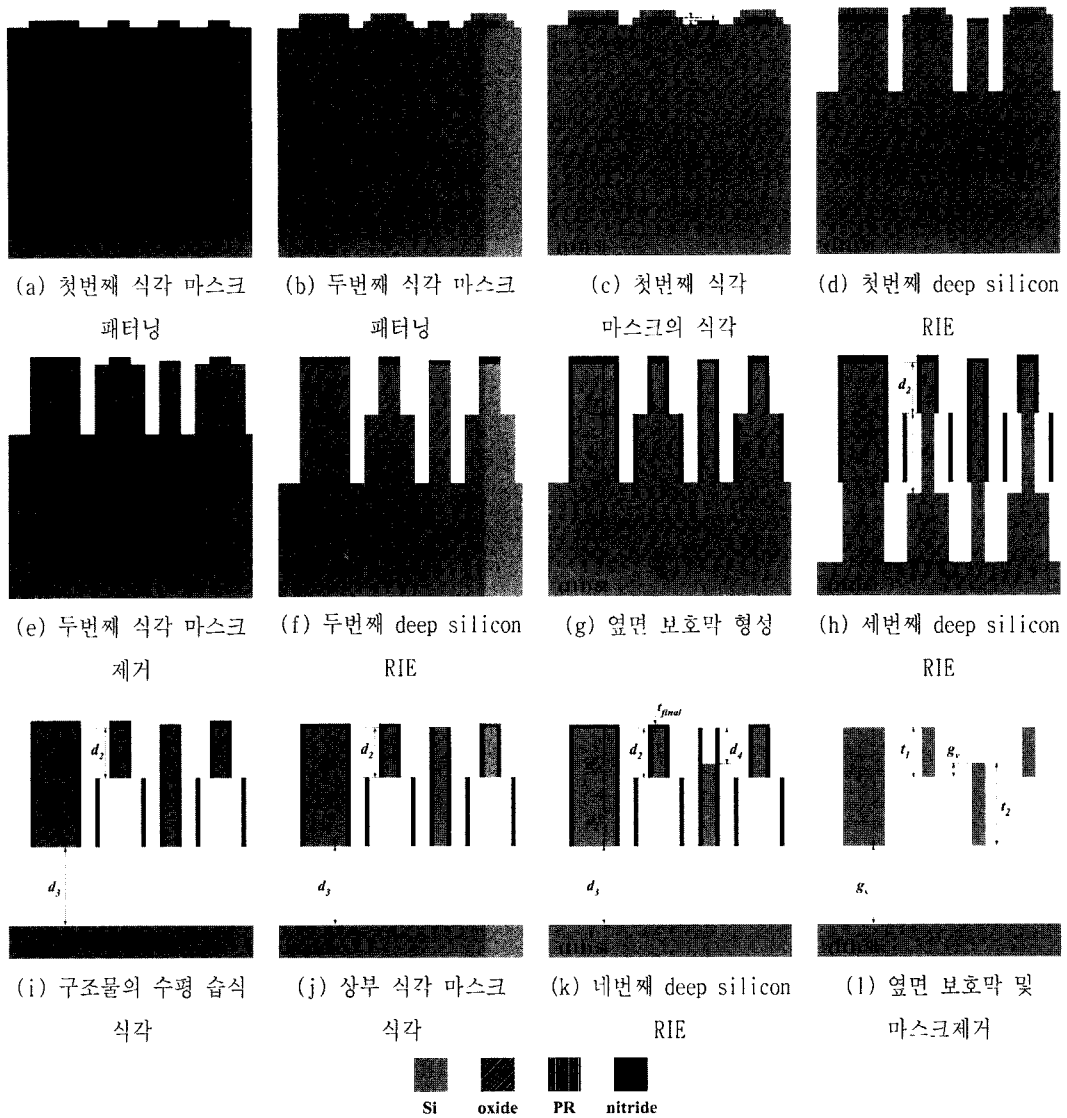


그림 1. Extended SBM 공정의 흐름도
 Fig. 1. Process flow of the Extended SBM technology.

비틀림 보를 기준으로 비대칭 질량 분포를 가지도록 설계되었다. 따라서 외부의 수직 가속도가 인가되면 검지 질량체는 질량 분포의 비대칭성으로 인하여 비틀림 운동을 발생시킨다. 이 운동은 검지 질량체에 부착된 수직 콦 전극 사이의 용량 변화를 발생시키며, 이 변화를 감지하여 가속도 신호를 검출하게 된다. 제작된 가속도계 구조물의 두께는 30 μm 이며 전체 크기는 가로 2.2 mm, 세로 1.9 mm이다. 또한 콦 전극의 길이는 410 μm , 폭 8 μm 로 하였다. 콦들 사이의 간격을 4 μm 로 설계하고, 상부 전극과 하부 전극 사이에 15 μm 의

단차를 줌으로써 배향면적을 400 $\mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ 로 설계하였다. 또한 비틀림 보의 단면적 4 $\mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$, 길이 40 μm 의 크기로 설계하였다.

그림 4는 ANSYS를 이용해 가속도계의 모드 해석을 수행한 결과이다. 시뮬레이션은 deep silicon RIE 시에 발생하는 언더컷 등 실제 공정 변수를 고려하여 수행되었다. 1차 모드의 공진주파수는 1.376 KHz, 2차 모드의 공진주파수는 15.9 KHz로서, 2차 모드의 공진주파수가 1차 모드의 공진주파수에 비해 10배 이상 큰 것을 알 수 있다. 따라서 가속도계의 1차 모드 구동 음

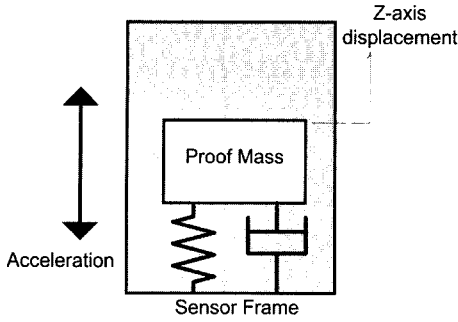


그림 2. 질량체, 스프링, 감쇠기를 이용한 가속도계의 2차 시스템 모델

Fig. 2. Second-order system model of the accelerometer using mass, spring and damper.

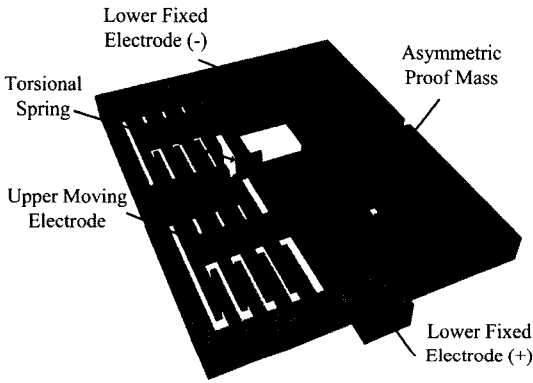


그림 3. 제안된 z 축 가속도계의 개념도

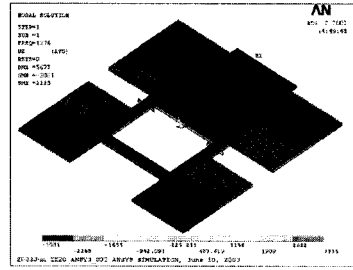
Fig. 3. Schematic diagram of the proposed z-axis accelerometer.

직임에 대하여 2차 모드의 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

3.2. 회전에 따른 수직 콤 사이의 정전 용량 변화의 선형성

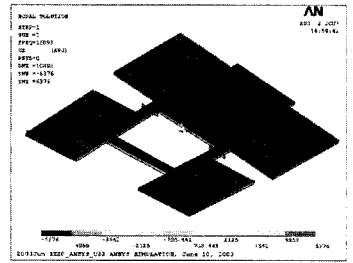
본 z 축 가속도계는 중앙의 비틀림 보를 중심으로 시소 타입의 회전 운동을 통하여 발생된 용량 변화를 측정한다. 따라서 회전 각도에 따른 수직 전극의 정전 용량 변화의 선형성을 살펴볼 필요가 있다. 그림 5는 z 축 가속도계의 이동 전극이 θ 만큼 회전하였을 때의 모습이다. 초기에 상하부 전극은 두께 t , 폭 $L-x_1$ 에 걸쳐 겹쳐져 있다. 상부 이동 전극과 x 축과의 교차점을 x_2 라 하고, 상부 이동 전극의 아래쪽 꼭지점의 x 축 좌표를 x_3 라 정의하면, x_2 와 x_3 는 각각 식 (1)과 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$x_2 = L \cos \theta + L \sin \theta \tan \theta \tag{1}$$



(a) z 축 가속도계의 1차 공진 모드(1376 Hz)

(a) First resonant mode of the z-axis accelerometer.



(b) Z 축 가속도계의 2차 공진 모드 (15.9 kHz)

(b) Second resonant mode of the z-axis accelerometer.

그림 4. z 축 가속도계의 모드 해석 결과

Fig. 4. Modal analysis results of the z-axis accelerometer.

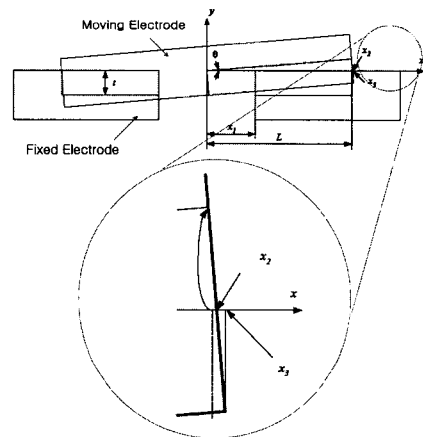


그림 5. 이동 전극이 θ 만큼 회전하였을 때의 단면도

Fig. 5. Cross-section when the moving electrode rotates at θ .

$$x_3 = (t \tan \theta + L) \cos \theta \tag{2}$$

외부 가속도 입력에 대한 회전 범위가 매우 작다고 가정하고, 수직 단차가 충분하여 프린팅 필드에 의한 비선형성은 없다고 가정하면, 전극간의 최종 배향 면적은 식 (3)과 같이 표시할 수 있다.

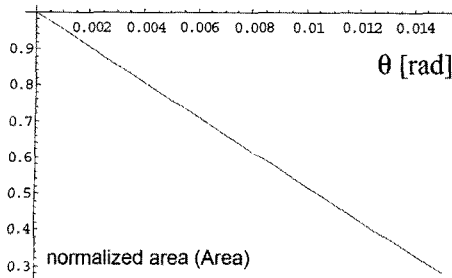


그림 6. 정규화된 수직 콦의 회전에 따른 전극간 겹침 면적의 변화

Fig. 6. Normalized changes of the overlapped area as the rotation of the vertical combs.

$$Area = \frac{1}{2}(2Lt - 2tx_1 \sec \theta + (t^2 + x_1^2 - L_2) \tan \theta) \quad (3)$$

이를 초기 면적에 대하여 정규화시킨 면적 변화를 도시하면 그림 6과 같다. 회전에 따른 수직 콦의 전극간 겹침 면적 변화로 인해 발생하는 비선형성은 무시할 만 하다는 것을 알 수 있다.

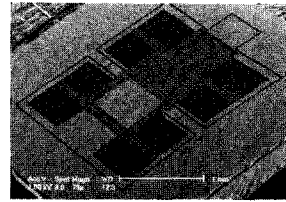
4. Z 축 가속도계의 제작 및 성능 평가

4.1. Z 축 가속도계의 제작 결과

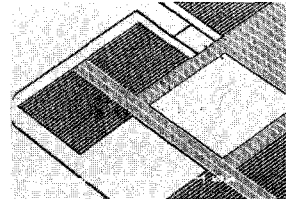
그림 7은 (111) SOI wafer 상에 Extended SBM 공정을 이용하여 제작된 z 축 가속도계의 SEM 사진이다. 제작된 가속도계의 주요 치수는 아래와 같다. 상부 및 하부 전극의 두께는 각각 30 μm이며, 회생층 간격 역시 30 μm이다. 또한 상하부 전극간의 수직 단차는 12 μm이며, 수평 간격은 4 μm이다. 그림 7(a)는 제작된 z 축 가속도계의 전체적인 모습을 보여주며, 그림 7(b)는 비틀림 보, 수직 콦 및 앵커부를 확대한 사진이다. 또한 그림 7(c)는 완전 단차를 가지는 완전 정렬된 수직 콦을 보여주며, 그림 7(d)에서 상부 전극과 하부 전극간의 확연한 수직 단차를 볼 수 있다.

4.2. Z 축 가속도계의 검지 회로

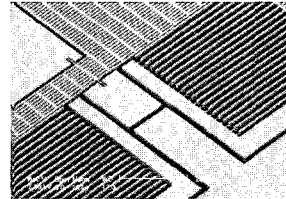
그림 8은 제작된 z 축 가속도계 검지회로의 개략도를 보여주고 있다. 본 가속도계는 이동 전극에 외부 캐리어 신호를 인가하고, 인가되는 가속도에 따라 두 검지 전극의 용량 변화를 차동 증폭하여 신호를 검출한다. 검지 회로의 첫 단은 두개의 전하 증폭기로 구성되며, 이를 통해 가속도계의 용량 변화가 전압으로 변환된다. 이 때 전하 증폭기는 고역 통과 필터의 양상을 보이며, 실제로 z 축 가속도계에 인가되는 가속도 신호의 대역은 DC에서 수 백 Hz에 해당하므로, 출력 신호



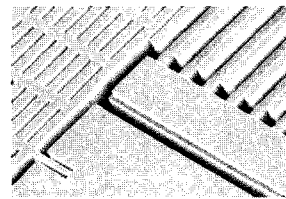
(a) 제작된 z 축 가속도계의 전체적인 모습
(a) Overall view of the z-axis accelerometer.



(b) 비틀림 보, 수직 콦, 앵커부의 모습
(b) Torsional beam, vertical comb, and anchors.



(c) 정렬 오차가 없는 완전 단차의 수직 콦
(c) Perfectly aligned vertical combs with full vertical offset.



(d) 수직 콦 구조의 확대 사진
(d) Magnified view of the vertical combs.

그림 7. Extended SBM 공정을 이용하여 제작된 z 축 가속도계

Fig. 7. Fabricated z-axis accelerometer using the Extended SBM process.

의 열화를 피하기 위하여 캐리어 신호를 이용한 복조 및 변조 기법을 이용하였다. 이후 원하지 않는 저주파 잡음을 제거하기 위하여 고역 통과 필터를 이용하고, 두 신호를 차동 증폭한 뒤 인가한 캐리어 신호를 이용하여 신호를 복조한다. 이후 가속도 신호만을 검출하기 위하여 저역 통과 필터를 통과하게 된다.

4.3. 제작된 z 축 가속도계의 특성 평가

그림 9는 제작된 z 축 가속도계의 주파수 응답 특성을 보여주고 있다. 출력 파형의 고역 통과 특성은 전하

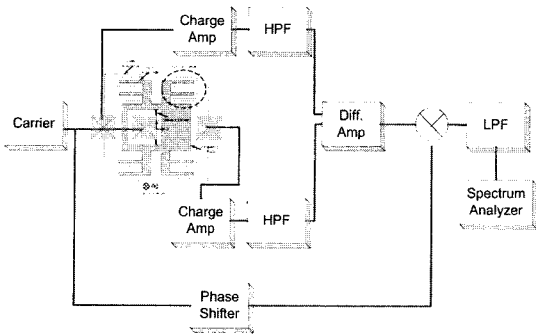


그림 8. 가속도계 검지회로의 개략도
Fig. 8. Schematic diagram of the accelerometer readout circuit.

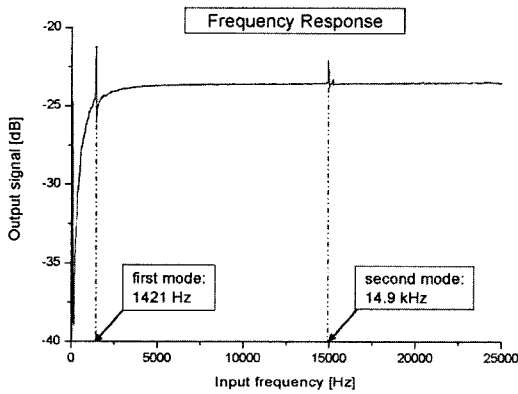
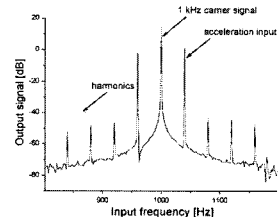


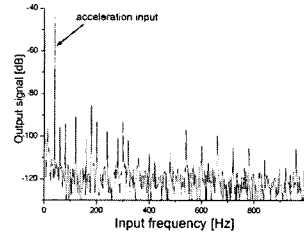
그림 9. 제작된 z 축 가속도계의 주파수 응답 특성
Fig. 9. Frequency response of the fabricated z-axis accelerometer.

증폭기의 특성이 반영된 것이며, 1.4 kHz와 14.9 kHz에서 두 피크를 관찰할 수 있다. 이는 z축 가속도계의 1차 모드 설계치인 1.376 kHz 및 2차 모드 설계치인 15.9 kHz와 유사함을 알 수 있다.

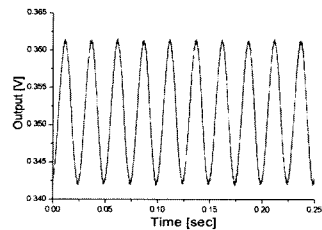
그림 10은 제작된 z 축 가속도계에 외부 가속도가 인가되었을 때의 출력 특성을 보여주고 있다. 캐리어 신호는 1 kHz의 신호를 사용하였으며, 외부 가속도는 sine 파 형태로 40 Hz, 5 g의 기계적 가속도가 인가되었다. 그림 10(a)는 차동 증폭기 출력단의 신호를 보여주고 있다. 40 Hz의 가속도 신호가 1 kHz의 캐리어 주파수에 변조된 것을 볼 수 있으며, 1 kHz의 캐리어 신호를 중심으로 40 Hz 만큼 떨어진 지점에 가속도 신호의 피크를 볼 수 있다. 가속도 신호의 SNR은 80 dB이며, 이를 통해 잡음 등가 가속도 분해능이 500 μ g임을 알 수 있다. 그림 10(b)는 변조된 신호를 캐리어 신호를 이용하여 복조한 뒤, 저역통과필터를 통과한 후의 검지회로의 최종 출력단의 신호를 보여주고 있다. 최종



(a) 캐리어에 변조된 가속도 신호의 출력파형
(a) Output spectrum of the acceleration signal modulated with the carrier.



(b) 복조 이후 가속도 신호의 출력 파형
(b) Output spectrum of the acceleration signal after demodulation.



(c) 시간축 영역에서 관찰한 가속도 신호의 출력 파형
(c) Time-domain output of the acceleration signal.

그림 10. 40 Hz, 5 g 가속도 입력에 대한 z 축 가속도계의 출력
Fig. 10. Output of the z-axis accelerometer when 40 Hz, 5 g acceleration input.

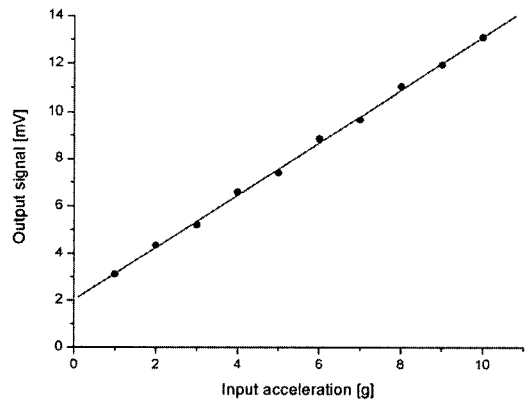


그림 11. 40 Hz 가속도 입력에 대한 가속도계의 입출력 특성
Fig. 11. Input-output characteristic when 40 Hz input acceleration.

표 1. 제작한 가속도계의 주요 성능 지수
Table 1. The measured performances

Detection range		> ± 10 [g]
1st Resonant frequency		1.42 [kHz]
Signal-to-noise ratio	Modulated	80 [dB]
	Demodulated	76.5 [dB]
Resolution	Modulated	500 [μ g]
	Demodulated	748 [μ g]
Sensitivity		1.1 [mV/g]
Linearity		1.18 [% FSO]

가속도 신호의 SNR은 76.5 dB이며, 이를 통해 잡음 등가 가속도 분해능은 748 μ g임을 알 수 있다. 그림 10(c)는 가속도계 검지회로의 최종 출력을 시간 축에서 관찰한 파형이다.

그림 11은 외부 인가 가속도의 주파수를 40 Hz에 고정하고, 인가 가속도를 증가시키면서 제작된 가속도 센서의 출력 특성을 측정된 결과이다. 그 결과, 출력 비선형성은 1.18% FSO이며, 출력 민감도는 1.1 mV/g, 입력 범위는 ± 10 g 이상인 것으로 측정되었다. 표 1에 제작한 가속도계의 주요 성능 지수를 요약하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 Extended SBM 공정을 이용하여 단결정 실리콘 상에 정렬 오차가 없는 완전 단차의 수직 콦 구조를 제작하고, 이를 이용하여 새로운 z 축 가속도계를 제작하였다. Extended SBM 공정은 첫번째 마스크에서 상하부 구조물간의 수평 간격을 비롯한 구조물의 주요 평면 치수를 모두 정의하기 때문에 상하부 구조물간의 정렬 오차가 없는 완전 정렬된 수직 구조물을 제작할 수 있다. 또한 상부, 하부 구조물의 두께 및 겹침 면적, 수직 단차, 희생층 간격 등을 임의로 정의할 수 있다는 장점이 있다.

제작된 z 축 가속도계는 비틀림 보를 중심으로 비대칭 질량이 배치되어 외부에서 z 축 가속도가 인가되면 시소 타입의 움직임を 보이며, 이를 이용하여 외부 가속도를 검지한다. 제작된 가속도계의 상부 및 하부 전극의 두께는 각각 30 μ m이며, 희생층 간격 역시 30 μ m로 제작되었다. 또한 상하부 전극간의 수직 단차는 12 μ m이며, 수평 간격은 4 μ m이다. 제작된 z 축 가속도계는 748 μ g의 해상도를 가지며, 출력 비선형성은 1.18% FSO, 출력 민감도는 1.1 mV/g, 입력 범위는 ± 10 g 이상인 것으로 측정되었다.

현재는 본 논문에서 제작한 z 축 가속도계의 결과를

바탕으로 다축 관성 센서를 단일 기판 상에 집적화 하는 연구가 진행중이다.

사 사

본 연구는 과학재단의 차량 능동안전도 향상을 위한 텔리메틱스 기반 통합 센싱 및 모니터링 시스템 개발 사업(R01-2003-000-10109-0)의 일부 지원과 U.S Navy의 일부 지원(N00014-02-C-0126) 하에 수행되었다.

참고 문헌

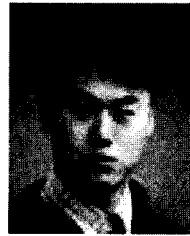
- [1] J. Lee, Y. Ko, H. Jeong, B. Choi, J. Kim, and D. Jeon, "SOI-Based Fabrication Processes of the Scanning Mirror Having Vertical Comb Fingers", *Sensors and Actuators A*, vol. 102, pp. 11-18, 2002.
- [2] R.A. Conant, J.T. Nee, K.Y. Lau, and R.S. Muller, "A Flat High-Frequency Scanning Micromirror", *Tech. Dig. Solid-state Sensor and Actuator Workshop*, pp. 6-13, 2000.
- [3] A. Hanneborg, "Silicon Wafer Bonding Techniques for Assembly of Micromechanical Elements", *Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 92-98, 1991
- [4] J. Kim, S. Park, and D. Cho, "A Novel Electrostatic Vertical Actuator Fabricated in One Homogeneous Silicon Wafer Using Extended SBM Technology", *Transducers 2001*, pp. 756-759, 2001.
- [5] J. Kim, S. Park, and D. Cho, "An Extended Double-SBM Process for Vertical Actuation and Sensing Using One Single-crystalline Silicon Wafer", *International MEMS Workshop 2001*, pp. 291-298, 2001.
- [6] J. Kim, S. Park, and D. Cho, "A Novel Electrostatic Vertical Actuator Fabricated in One Homogeneous Silicon Wafer Using Extended SBM Technology", *Sensors and Actuators A*, pp. 653-658, 2002.
- [7] A. Selvakumar, F. Ayazi, and K. Najafi, "A High Sensitivity z-axis Torsional Silicon Accelerometer", *The International Electron Devices Meeting 96*, 1996.
- [8] S. Lee, B. Lee, K. Jung, J. Choi, T. Chung, and Y. Cho, "Extension of Surface/Bulk Micromachining: One-mask Fabrication Technology Enabling the Integration of 6-DOF Inertial Sensors on a Single Wafer", *Transducers'01*, pp. 1136-1139, 2001.
- [9] D. Kwak, J. Kim, S. Park, H. Ko, and D. Cho, "Why is (111) Silicon a better Mechanical Material for MEMS: Torsion Case", *2003 ASME International Mechanical Engineering Congress*, pp. 15-21, 2003.
- [10] S. Lee, S. Park, and D. Cho, "The Surface/Bulk

- Micromachining (SBM) Process: A New Method for Fabricating Released Microelectromechanical Systems in Single Crystal Silicon”, *IEEE/ASME JMEMS*, vol. 8, pp. 409-416, 1999.
- [11] D. Cho, S. Lee, and S. Park, “Surface/Bulk Micromachined High Performance Silicon Micro-gyroscope”, *Hilton Head 2000*, 2000.
- [12] S. Lee, S. Park, J. Kim, S. Yi, and D. Cho, “Surface/Bulk Micromachined Single-crystalline Silicon Microgyroscope”, *IEEE/ASME JMEMS*, vol. 8, no. 4, pp. 557-567, 2000.
- [13] J. Kim, S. Park, D. Kwak, H. Ko, W. Carr, J. Buss, and D. Cho, “Robust SOI Process without Footing for Ultra High-Performance Microgyroscopes”, *Transducers'03*, pp. 1691-1694, 2003.
- [14] S. Park, J. Kim, D. Kwak, H. Ko, D. Cho, W. Carr, and J. Buss, “A New Isolation Method for Single Crystal Silicon MEMS and Its Application to Z-axis Microgyroscope”, *The International Electron Devices Meeting 2003*, Washington D.C., pp. 969-972, 2003.



고형호

• 2003년 ~ 현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 석사과정 재학중



김종팔

• 2003년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부, 공학박사



박상준

• 2004년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부, 공학박사



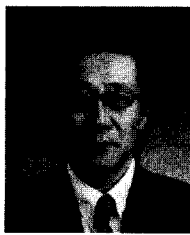
광동훈

• 2002년 ~ 현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 석사과정 재학중



송태용

• 2003년 ~ 현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 석사과정 재학중



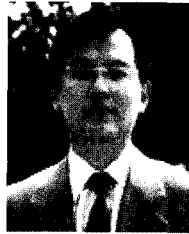
조동일

• 1987년 미국 Massachusetts Institute of Technology, 공학박사
 • 1993년 ~ 현재 서울대학교공과대학전기컴퓨터공학부조교수/부교수/교수
 • 1996년 ~ 현재 서울대학교 공과대학 기술정책과정 겸임교수
 • 2002년 ~ 현재 서울대학교 나노과학기술협동과정 겸임교수
 • 2003년 ~ 현재 서울대학교 마이크로시스템 기술센터 센터장
 • 2003년 ~ 현재 (사단법인) MEMS기술연구조합 이사장



허 건 수

- 1992년 미국 University of Michigan, 공학박사
- 현재 한양대학교 기계공학부 부교수



박 장 현

- 1992년 미국 Massachusetts Institute of Technology, 공학박사
- 현재 한양대학교 기계공학부 부교수